



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

## Facultad de Ingeniería

### Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

---

## Diseño y construcción de un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores

---

---

*Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones.*

---

#### **Autores :**

Miguel Angel Mendieta Sarmiento

C.I. 0705963684

Christian Oswaldo Muñoz Jimbo

C.I. 0105618052

#### **Director :**

Ing. Luis Gerardo Gonzalez Morales, Ph.D.

C.I. 1729711059

---

Cuenca - Ecuador

Febrero 2019



# Resumen

Este trabajo de titulación detalla la construcción de un sistema de gestión de energía que dará soporte al proyecto desarrollado por la universidad de Cuenca, denominado “Prototipo de exoesqueleto usable en las extremidades inferiores”. El sistema propuesto se encargará de suministrar la energía necesaria para los componentes del exoesqueleto, como: motores, sensores, microcontroladores, etc.

El sistema de gestión de energía estará constituido por 3 partes principales: una fuente de energía conformada por un banco baterías creado a través de la unión de 8 celdas de ion de litio cuya capacidad fue escogida en base a un cálculo de la energía a ser consumida por el sistema, con la finalidad de obtener una autonomía de 90 minutos; un circuito integrado encargado de monitorear y tomar medidas de voltajes y temperaturas de la celdas mediante comandos enviados por un microcontrolador, y un cargador, externo al sistema, encargado de recargar la celdas que conforma la fuente de energía.

Con la finalidad de proteger las celdas de ion de litio, se incluyen los aspectos constructivos de un contenedor de material flexible y resistente, de tal forma que las celdas quedarán protegidas contra la intemperie. Finalmente, debido al peso de las baterías se incluirá una mochila como contenedor de los componentes de la fuente y del Sistema de Gestión, para así mejorar la portabilidad del proyecto.

**Palabras Clave:** Análisis de autonomía. Balanceo. Estimación. Convertidor DC-DC. Sistema de gestión de baterías. Termistores y medidores de voltaje.





# Abstract

This degree work details the construction of an energy management system that will support the project developed by the University of Cuenca, called "Prototype of usable exoskeleton on lower extremities". The proposed system will be responsible for supplying the necessary energy for the components of the exoskeleton, such as: motors, sensors, microcontrollers, etc.

The energy management system will consist of 3 main parts: an energy source formed by a battery bank created through the union of 8 cells of lithium ion whose capacity was chosen based on a of the energy that will be consumed by the system, in order to obtain an autonomy of 90 minutes; an integrated circuit responsible for monitoring and taking measurements of cell voltages and temperatures through commands sent by a microcontroller, and a charger, external to the system, charged responsible for recharging the cells which make up the energy source.

In order to protect the lithium ion cells, the constructive aspects of a container made of a flexible and resistant material are included, in such a way that the cells are protected against the weather. Finally, due to the weight of the batteries, a backpack will be included as a container for the components of the source and the Management System, in order to improve the portability of the project.

**Keywords:** Autonomy analysis. Cell balancing. Estimation. DC-DC converter. Battery management system. Thermistors and voltage meters.



# Índice general

Resumen	II
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de figuras	XIV
Índice de tablas	XXIV
Índice de Algoritmos	XXVI
Dedicatoria	XXXI
Dedicatoria	XXXII
Agradecimientos	XXXIII
Agradecimientos	XXXIV
Abreviaciones y acrónimos	XXXV
1. Introducción	1



1.1. Introducción . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	2
1.3. Alcance . . . . .	3
1.4. Objetivos . . . . .	3
1.4.1. Objetivo General . . . . .	3
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Exoesqueleto . . . . .	5
2.2. Sistema de Almacenamiento (Baterías de Ion Litio) . . . . .	5
2.2.1. Presentaciones . . . . .	6
2.2.2. Composición química de las baterías de Ion Litio . . . . .	6
2.2.3. Seguridad de las baterías de Ion Litio . . . . .	8
2.2.4. Eficiencia de las baterías de Ion Litio . . . . .	8
2.3. Tipos de conexiones de celdas en los bancos de baterías . . . . .	9
2.3.1. Conexión en serie . . . . .	9
2.3.2. Conexión en paralelo . . . . .	10
2.3.3. Conexión serie-paralelo . . . . .	10
2.4. Estimación del estado de carga en baterías de Ion Litio . . . . .	12
2.4.1. Estimación por voltaje . . . . .	12
2.4.2. Estimación con contador de Coulombs . . . . .	13
2.5. Balanceo ó Ecualización de celdas . . . . .	13
2.6. Tipos de Balanceo de celdas . . . . .	14



2.6.1. Balanceo Pasivo . . . . .	15
2.6.2. Balanceo Activo . . . . .	15
2.6.2.1. Utilizando condensadores como sistema de respaldo temporal . .	16
2.6.2.2. Utilizando inductores/transformadores . . . . .	17
2.6.2.3. Balanceo utilizando convertidores . . . . .	20
2.7. Sistema de gestión de baterías (Battery Management System . . . . .	25
2.7.1. Toma de medidas . . . . .	26
2.7.2. Estimación del Estado de Carga (SoC) . . . . .	28
2.7.3. Estimación del Estado de salud (SoH) . . . . .	28
2.7.4. Estimación de la capacidad . . . . .	28
2.7.5. Gestión térmica . . . . .	29
2.7.6. Balanceo ó Ecualización . . . . .	29
2.7.7. Detección de fuga . . . . .	29
2.7.8. Bloque de señal . . . . .	30
2.8. Motores eléctricos, driver y controlador . . . . .	30
2.8.1. Motores del exoesqueleto . . . . .	30
2.8.2. Driver controlador de motores . . . . .	31
2.9. Comunicación entre dispositivos . . . . .	32
<b>3. Elección y estimación energética de los componentes</b>	<b>36</b>
3.1. Consumo Energético de los drivers y motores . . . . .	37
3.1.1. Consumo Energético de los motores . . . . .	37
3.1.2. Consumo de pines de control del driver . . . . .	37



3.2.	Consumo etapa de procesamiento de control . . . . .	38
3.3.	Consumo de electrónica de control . . . . .	38
3.4.	Convertidores DC-DC . . . . .	38
3.4.1.	Convertidor DC-DC VX780X-1000 . . . . .	38
3.4.2.	Convertidor DC-DC XL4015 DC-DC de 75 W . . . . .	39
3.5.	Circuito integrado de Gestión de Baterías . . . . .	41
3.5.1.	Circuito Integrado Bq769x0 . . . . .	41
3.5.2.	Circuito Integrado ISL94202 . . . . .	41
3.5.3.	Circuito Integrado LTC6801 . . . . .	42
3.5.4.	Circuito Integrado LTC6802-1 . . . . .	43
3.5.5.	Circuito Integrado LTC6802-2 . . . . .	43
3.6.	Sensores . . . . .	45
3.6.1.	Termistor NTC NTCLE413 . . . . .	45
3.6.2.	Sensor de Corriente ACS712 . . . . .	45
3.7.	Microcontrolador . . . . .	46
3.8.	Comunicación hacia el sistema Central . . . . .	48
3.9.	Cables y conectores . . . . .	49
3.9.1.	Conectores para el banco de baterías . . . . .	49
3.9.2.	Conectores para el monitoreo de celdas . . . . .	49
3.9.3.	Conectores para la alimentación de los drivers y electrónica . . . . .	49
3.9.4.	Conector para la carga . . . . .	50
3.10.	Autonomía del Sistema . . . . .	51
3.10.1.	Consumo total de Energía . . . . .	51



3.10.2. Consumo real de energía . . . . .	51
3.10.3. Baterías 26Ah Prismatic Pouch Cell . . . . .	53
<b>4. Sistema de Gestión de Energía</b>	<b>56</b>
4.1. Configuración de las Celdas en el Banco de Baterías . . . . .	57
4.2. Circuito Integrado LTC6802-2 . . . . .	57
4.2.1. Configuración de pines del Integrado BMS . . . . .	57
4.2.2. Principio de Operación del CI LTC6802-2 . . . . .	60
4.2.3. Balanceo de Celdas . . . . .	61
4.2.4. Uso del LTC6802-2 con menos de 12 celdas . . . . .	62
4.2.5. Modos de Operación . . . . .	63
4.2.5.1. Modo Standby . . . . .	63
4.2.5.2. Modo Medición . . . . .	63
4.2.5.3. Modo Monitoreo . . . . .	63
4.2.6. Registros y Comandos de Configuración . . . . .	64
4.2.7. Comunicación Serial . . . . .	68
4.3. Cargador de Baterías . . . . .	69
4.3.1. Características del Cargador PB-360P-24 . . . . .	69
4.3.2. Estados de Carga . . . . .	70
4.3.3. Funcionamiento del Cargador . . . . .	70
4.4. Diseño del Sistema de Gestión de Energía . . . . .	71
4.4.1. Principio de operación . . . . .	72
<b>5. Desarrollo Técnico del Sistema</b>	<b>74</b>



5.1. Construcción del Banco de Baterías . . . . .	75
5.1.1. Configuración de las celdas . . . . .	75
5.1.2. Construcción del contenedor del Banco de Baterías . . . . .	76
5.1.3. Caracterización del Banco de Baterías . . . . .	78
5.2. Diseño del Sistema de Gestión de Energía . . . . .	79
5.2.1. Circuitos . . . . .	79
5.2.1.1. Sistema de Gestión del Banco de Baterías . . . . .	79
5.2.1.2. Sistema de alimentación . . . . .	83
5.2.1.3. Construcción del PCB final . . . . .	85
5.2.1.4. Contenedor de PCB . . . . .	85
5.2.2. Mochila Contenedora . . . . .	86
5.2.3. Algoritmo del microcontrolador . . . . .	88
5.3. Resultados . . . . .	92
5.3.1. Prueba de Comunicación . . . . .	92
5.3.2. Balanceo de Celdas . . . . .	92
5.3.3. Primera Prueba con una Carga Resistiva . . . . .	94
5.3.4. Segunda Prueba con una Carga Resistiva . . . . .	102
5.3.5. Tercera Prueba con una Carga Resistiva . . . . .	108
5.3.6. Consumo energético del exoesqueleto . . . . .	114
<b>6. Conclusiones</b>	<b>120</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	121
6.2. Trabajos Futuros . . . . .	122



<b>A. Diagramas, Esquemas y Tablas del CI LTC6802-2</b>	<b>124</b>
A.1. Conexión de 3 CI LTC6802-2 a un mismo microcontrolador . . . . .	124
A.2. Registros . . . . .	126
<b>B. Calibración de Sensores</b>	<b>127</b>
B.1. Termistor NTC NTCLE413 . . . . .	127
B.2. Sensor de Corriente ACS712 . . . . .	132
<b>C. Diseño de los Circuitos Electrónicos</b>	<b>134</b>
C.1. Esquemáticos y PCB del circuito para el balanceo externo . . . . .	134
C.2. Esquemáticos y PCB del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura	137
C.3. Esquemáticos y PCB del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros . . . . .	139
C.4. Esquemáticos y PCB del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada . . . . .	141
C.5. Esquemáticos y PCB del circuito final . . . . .	143
<b>D. Prototipos del Sistema de Gestión de Energía</b>	<b>145</b>
D.1. Primer Prototipo . . . . .	145
D.1.1. Circuito del CI LTC6802-2 . . . . .	146
D.1.2. Circuito de Balanceo . . . . .	146
D.1.3. Circuito de Comunicación y Monitoreo de temperatura . . . . .	147
D.2. Algoritmos del microcontrolador . . . . .	149
D.3. Resultados del Primer Prototipo . . . . .	158
D.3.1. Comprobación de la comunicación entre el microcontrolador y el integrado LTC6802-2 . . . . .	158





D.3.2. Lectura de Voltajes y Temperaturas . . . . .	159
D.3.3. Balanceo de celdas . . . . .	160
D.4. Segundo Prototipo . . . . .	165
D.4.1. Circuito con Leds y Buzzer . . . . .	165
D.4.2. Segunda versión del Algoritmo . . . . .	166
D.5. Pruebas y Resultados de Segundo Prototipo . . . . .	169
D.6. Aplicación del Cargador . . . . .	171
D.6.1. Carga de Celdas . . . . .	171
D.6.2. Aplicación del Sensor de Corriente . . . . .	173
D.6.3. Medición de Temperatura durante la Carga . . . . .	174
D.7. Pruebas de los Conversores DC-DC . . . . .	175
<b>E. Funciones del Microcontrolador</b>	<b>178</b>
E.1. Función de Escritura de Registros . . . . .	178
E.2. Función de Lectura de Voltajes . . . . .	179
E.3. Función de Lectura de Temperatura . . . . .	180
E.4. Función de Balanceo de Celdas . . . . .	181
E.5. Función de Estado de Carga . . . . .	182
E.6. Función de Carga de Celdas . . . . .	183
E.7. Función de Medición de Corriente . . . . .	184
<b>F. Pruebas del Sistema de Gestión de Energía</b>	<b>185</b>
F.1. Balanceo de Celdas . . . . .	186
F.2. Resultados de la Primera Prueba . . . . .	187



F.2.1. Voltaje del Banco Durante la Descarga . . . . .	187
F.2.2. Voltaje de las Celdas durante la Descarga . . . . .	188
F.2.3. Corriente durante la Descarga . . . . .	189
F.2.4. Energía entregada por el Banco de Baterías . . . . .	190
F.2.5. Voltaje del Banco Durante la Carga . . . . .	191
F.2.6. Voltaje de las Celdas durante la Carga . . . . .	192
F.2.7. Corriente durante la Carga . . . . .	193
F.2.8. Energía entregada por el Cargador PB-360P-24 . . . . .	194
F.3. Resultados de la Segunda Prueba . . . . .	195
F.3.1. Voltaje del Banco Durante la Descarga . . . . .	195
F.3.2. Voltaje de las Celdas durante la Descarga . . . . .	196
F.3.3. Corriente durante la Descarga . . . . .	197
F.3.4. Energía entregada por el Banco de Baterías . . . . .	198
F.3.5. Voltaje del Banco Durante la Carga . . . . .	199
F.3.6. Voltaje de las Celdas durante la Carga . . . . .	200
F.3.7. Corriente durante la Carga . . . . .	201
F.3.8. Energía entregada por el Cargador PB-360P-24 . . . . .	202
F.4. Resultados de la Tercera Prueba . . . . .	204
F.4.1. Voltaje del Banco Durante la Carga . . . . .	204
F.4.2. Corriente durante la Carga . . . . .	205
F.4.3. Energía entregada por la fuente DE LORENZO DL 1059 . . . . .	206
F.4.4. Amperios hora durante la Carga . . . . .	207
F.4.5. Voltaje del Banco Durante la Descarga . . . . .	208



F.4.6. Corriente durante la Descarga . . . . .	209
F.4.7. Energía entregada por el Banco de Baterías . . . . .	210
F.4.8. Amperios hora durante la Descarga . . . . .	211
F.5. Consumo energético del exoesqueleto . . . . .	213
F.5.1. Voltaje del Banco Durante la Carga . . . . .	213
<b>G. Análisis de Costo Estimado</b>	<b>221</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>223</b>



# Índice de figuras

2.1. Exoesqueleto de dos grados de libertad para asistir la pierna derecha . . . . .	5
2.2. Presentaciones de las celdas de Ion-Litio . . . . .	6
2.3. Energía específica vs. densidad de energía de las tecnologías de Ion-Litio . . . . .	7
2.4. Conexión en serie de 4 celdas . . . . .	10
2.5. Conexión en paralelo de 4 celdas . . . . .	11
2.6. Conexión serie/paralelo de 4 celdas . . . . .	11
2.7. Curva de voltaje vs. estado de carga de una batería de Ion-Litio . . . . .	12
2.8. Tipos de Balanceo de carga en baterías de Ion-Litio . . . . .	14
2.9. Balanceo pasivo: a) resistencia de derivación fija, b) resistencia de derivación conmutable . . . . .	16
2.10. Balanceo activo utilizando condensadores. a) condensador conmutable, b) con- densador único conmutable, c) doble condensador conmutable. . . . .	17
2.11. Balanceo activo utilizando inductores. a) configuración con único inductor, b) configuración con múltiples inductores. . . . .	18
2.12. Balanceo activo utilizando un transformador de bobina simple. . . . .	19
2.13. Balanceo activo utilizando transformador multi bobinas. a) conexión flyback, b) conexión forward. . . . .	19
2.14. Balanceo activo utilizando múltiples transformadores. . . . .	20



2.15. Balanceo activo utilizando un convertidor Cuk. . . . .	21
2.16. Balanceo activo utilizando un convertidor Buck. . . . .	22
2.17. Balanceo activo utilizando un convertidor Buck-Boost. . . . .	22
2.18. Balanceo activo utilizando un convertidor Flyback. . . . .	23
2.19. Balanceo activo utilizando un convertidor tipo rampa. . . . .	23
2.20. Balanceo activo utilizando un convertidor full-bridge. . . . .	24
2.21. Balanceo activo utilizando un convertidor quasi-resonante. . . . .	25
2.22. Funciones de un <a href="#">BMS</a> . . . . .	26
2.23. Toma de medidas con arquitectura centralizada . . . . .	27
2.24. Toma de medidas con arquitectura descentralizada . . . . .	27
2.25. Sistemas de refrigeración para bancos de baterías . . . . .	29
2.26. Motor EC 45, esquema a la izquierda, aspecto del motor a la derecha . . . . .	31
2.27. Motor EC 90, esquema a la izquierda, aspecto del motor a la derecha . . . . .	31
2.28. Driver EPOS4 Module 50/8 . . . . .	32
2.29. Conexión <a href="#">SPI</a> entre dispositivos Maestro-Eslavos . . . . .	33
2.30. Modo 0 de la comunicación <a href="#">SPI</a> . . . . .	34
2.31. Modo 1 de la comunicación <a href="#">SPI</a> . . . . .	35
2.32. Modo 2 de la comunicación <a href="#">SPI</a> . . . . .	35
2.33. Modo 3 de la comunicación <a href="#">SPI</a> . . . . .	35
3.1. Conversor VX780X-1000 . . . . .	39
3.2. Módulo XL4015 <a href="#">DC-DC</a> 75 W . . . . .	40
3.3. Valores absolutos máximos del <a href="#">CI</a> bq769x0 . . . . .	42



3.4. Kit ISL94202EVKIT1Z . . . . .	43
3.5. <a href="#">CI LTC6802-2</a> . . . . .	44
3.6. Termistor NTCLE413 . . . . .	45
3.7. Termistor NTCLE413 . . . . .	46
3.8. Arduino Nano . . . . .	47
3.9. Conexión entre LTC6802-2 y un microcontrolador Arduino . . . . .	47
3.10. Raspberry Pi 3 modelo B . . . . .	48
3.11. Conectores para el banco de baterías. De izquierda a derecha: arandela de 24 mm, arandela de 14 mm, tornillo de 3/16 de pulgada y tuerca. . . . .	49
3.12. Conector de 10 pines de 4.2 mm. Arriba: conector hembra. Abajo: conector macho	50
3.13. Conectores para la alimentación . . . . .	50
3.14. Conector automotriz de 9 pines . . . . .	51
3.15. Andar de una persona . . . . .	53
3.16. Batería 26h A123 system . . . . .	54
4.1. Distribución de pines del integrado . . . . .	58
4.2. Conexión de resistencias externas al LTC6802-2 para balanceo . . . . .	59
4.3. Esquema de un circuito para balanceo externo . . . . .	61
4.4. Conexión de 7 celdas al <a href="#">CI LTC6802-2</a> . . . . .	62
4.5. Envío de los comandos Broadcast . . . . .	68
4.6. Envío de comandos a un dispositivo específico . . . . .	68
4.7. Transmisión de un dato usando la interfaz <a href="#">SPI</a> . . . . .	69
4.8. Cargador PB-360P-24 . . . . .	69
4.9. Curvas de Voltaje y Corriente durante una carga . . . . .	71



4.10. Esquema del Sistema de Gestión de Energía a desarrollarse . . . . .	72
5.1. Unión de dos Celdas . . . . .	75
5.2. Conector para monitoreo de Celdas . . . . .	76
5.3. Conexión del cable AWG 8 a una Celda . . . . .	76
5.4. Contenedor de Baterías . . . . .	77
5.5. Banco de baterías (vista Frontal) . . . . .	77
5.6. Banco de baterías (vista Superior) . . . . .	78
5.7. Voltaje entregado por el banco de baterías . . . . .	78
5.8. Circuito esquemático para el balanceo pasivo . . . . .	80
5.9. CI LTC6802-2 circuito esquemático . . . . .	81
5.10. Circuito esquemático para el monitoreo de temperaturas . . . . .	82
5.11. Circuito esquemático para los indicadores visuales e indicador sonoro . . . . .	82
5.12. Circuito esquemático para el estado del cargador . . . . .	83
5.13. Circuito esquemático para el microcontrolador . . . . .	83
5.14. Circuito esquemático para las salidas de 5 V y 3.3 V . . . . .	84
5.15. Distribución de los voltajes en el conector de 8 pines 4x2. . . . .	84
5.16. Circuito esquemático para la salida de la raspberry . . . . .	85
5.17. Circuito esquemático para las salidas auxiliares de 5 V y 3.3 V . . . . .	85
5.18. Izquierda.- Cara superior del PCB final. Derecha.- Cara inferior del PCB final. .	86
5.19. Izquierda.- Contenedor del PCB. Derecha.- Contenedor del PCB junto con el contenedor del banco de baterías . . . . .	86
5.20. Izquierda.- Compartimiento principal con las hebillas de plástico. Derecha.- Con- tenedor asegurado al compartimiento principal . . . . .	87



5.21. Prensa-estopas en la mochila. Arriba.- Ubicación de los prensa-estopas. Abajo.- Prensa-estopas con salidas para drivers y electrónica . . . . .	88
5.22. Hebillas y correas adaptadas a la mochila. Izquierda.- Hebillas y correas adaptadas a los tirantes. Derecha.- Mochila transportada por una persona . . . . .	89
5.23. Ejecución del Algoritmo Final . . . . .	93
5.24. Resultado del Balanceo de Celdas . . . . .	94
5.25. Voltaje del Banco durante la Descarga . . . . .	95
5.26. Voltaje de Celdas durante la Descarga . . . . .	96
5.27. Corriente del Banco durante la Descarga . . . . .	97
5.28. Energía Entregada por el banco de baterías . . . . .	97
5.29. Temperatura del banco de baterías durante la Descarga . . . . .	98
5.30. Voltaje durante la Carga . . . . .	99
5.31. Voltaje de Celdas durante la Carga . . . . .	99
5.32. Corriente del Banco durante la Carga . . . . .	100
5.33. Energía Entregada por el Cargador . . . . .	101
5.34. Temperatura del banco de baterías durante la Carga . . . . .	102
5.35. Voltaje Durante la Carga . . . . .	103
5.36. Voltaje de Celdas durante la Carga . . . . .	103
5.37. Corriente del Banco durante la Carga . . . . .	104
5.38. Energía Entregada por el Cargador . . . . .	104
5.39. Temperatura del banco de baterías durante la Carga . . . . .	105
5.40. Voltaje Durante la Descarga . . . . .	106
5.41. Voltaje de Celdas durante la Descarga . . . . .	106





5.42. Corriente del Banco durante la Descarga . . . . .	107
5.43. Energía Entregada por el banco de baterías . . . . .	107
5.44. Temperatura del banco de baterías durante la Descarga . . . . .	108
5.45. Voltaje Durante la Carga . . . . .	109
5.46. Corriente del Banco durante la Carga . . . . .	110
5.47. Amperios hora durante la Carga . . . . .	110
5.48. Energía Entregada por el Cargador . . . . .	111
5.49. Voltaje Durante la Descarga . . . . .	112
5.50. Corriente del Banco durante la Descarga . . . . .	113
5.51. Energía Entregada por banco de baterías . . . . .	113
5.52. Amperios hora durante la Descarga . . . . .	114
5.53. Voltaje durante la prueba sin carga . . . . .	115
5.54. Corriente durante la prueba sin carga . . . . .	115
5.55. Amperios hora durante la prueba sin carga . . . . .	116
5.56. Energía durante la prueba sin carga . . . . .	116
5.57. Voltaje durante la prueba sin carga . . . . .	117
5.58. Corriente durante la prueba sin carga . . . . .	118
5.59. Amperios hora durante la prueba sin carga . . . . .	118
5.60. Energía durante la prueba sin carga . . . . .	119
A.1. Conexión de 3 LTC6802-2 . . . . .	125
B.1. Circuito del termistor . . . . .	129



B.2. Temperatura en función del voltaje medido usando valores de resistencia mínima y máxima . . . . .	130
B.3. Gráfica de temperatura vs voltaje usando los valores de resistencia mínima: Datos técnicos vs Aproximación . . . . .	131
B.4. Gráfica de temperatura vs voltaje usando los valores de resistencia máxima: Datos técnicos vs Aproximación . . . . .	131
C.1. Esquemático del circuito de balanceo externo . . . . .	135
C.2. Diseño del PCB del circuito de balanceo externo . . . . .	136
C.3. Diseño del PCB en 3D del circuito de balanceo externo . . . . .	136
C.4. Esquemático del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura . . . . .	137
C.5. Diseño del PCB del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura . . . . .	138
C.6. Diseño del PCB en 3D del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura	138
C.7. Esquemático del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros . . . . .	139
C.8. Diseño del PCB del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros	140
C.9. Diseño del PCB en 3D del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros . . . . .	140
C.10. Esquemático del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada	141
C.11. Diseño del PCB del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada . . . . .	142
C.12. Diseño del PCB en 3D del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada . . . . .	142
C.13. Esquemático del circuito final . . . . .	143
C.14. Diseño del PCB del circuito final . . . . .	144
C.15. Diseño del PCB en 3D del circuito final . . . . .	144



D.1. PCB para el CI LTC6802-2 . . . . .	146
D.2. Circuito de balanceo pasivo mediante resistencia conmutable . . . . .	147
D.3. PCB para el balanceo externo de las celdas . . . . .	147
D.4. Circuito de comunicación y monitoreo de temperatura . . . . .	148
D.5. PCB para la comunicación y monitoreo de temperatura . . . . .	148
D.6. Distribución de pines en un Arduino Nano . . . . .	150
D.7. Esquema de conexión de los termistores al LTC6802-2 . . . . .	153
D.8. Primer Prototipo del sistema de gestión de energía . . . . .	158
D.9. Prueba de escritura y lectura registros . . . . .	159
D.10. Medición de voltajes y temperaturas . . . . .	160
D.11. Resultado del algoritmo de balanceo . . . . .	161
D.12. Datos almacenados dentro del archivo .txt . . . . .	162
D.13. Resultado del primer balanceo . . . . .	163
D.14. Balanceo con celdas muy desequilibradas . . . . .	164
D.15. PCB de los indicadores y el microcontrolador Arduino NANO . . . . .	166
D.16. Indicador led de carga media . . . . .	170
D.17. Indicador led de carga baja . . . . .	170
D.18. Curva de Voltaje de las Celdas usando el cargador PB-360P-24 . . . . .	172
D.19. Celdas . . . . .	174
D.20. Celdas . . . . .	175
D.21. Sistema alimentando al raspberry . . . . .	176
D.22. Salida de 5 V . . . . .	176
D.23. Salida de 3.3 V . . . . .	177



F.1. Resultado del Balanceo de Celdas . . . . .	186
F.2. Voltaje durante la Descarga . . . . .	187
F.3. Voltaje de Celdas durante la Descarga . . . . .	188
F.4. Corriente de Celdas durante la Descarga . . . . .	189
F.5. Energía Entregada por el Banco de Baterías . . . . .	190
F.6. Voltaje Durante la Carga . . . . .	191
F.7. Voltaje de Celdas durante la Carga . . . . .	192
F.8. Corriente de Celdas durante la Carga . . . . .	193
F.9. Energía Entregada por Cargador . . . . .	194
F.10.Voltaje durante la Descarga . . . . .	195
F.11.Voltaje de Celdas durante la Descarga . . . . .	196
F.12.Corriente de Celdas durante la Descarga . . . . .	197
F.13.Energía Entregada por el Banco de Baterías . . . . .	198
F.14.Voltaje Durante la Carga . . . . .	199
F.15.Voltaje de Celdas durante la Carga . . . . .	200
F.16.Corriente de Celdas durante la Carga . . . . .	201
F.17.Energía Entregada por Cargador . . . . .	202
F.18.Voltaje Durante la Carga . . . . .	204
F.19.Corriente del Banco durante la Carga . . . . .	205
F.20.Energía Entregada por la Fuente DE LORENZO DL 1059 . . . . .	206
F.21.Amperios hora durante la Carga . . . . .	207
F.22.Voltaje durante la Descarga . . . . .	208
F.23.Corriente de Celdas durante la Descarga . . . . .	209



F.24. Energía Entregada por el Banco de Baterías . . . . .	210
F.25. Amperios hora durante la Descarga . . . . .	211
F.26. Voltaje durante la prueba sin carga . . . . .	213
F.27. Corriente durante la prueba sin carga . . . . .	214
F.28. Amperios hora durante la prueba sin carga . . . . .	215
F.29. Energía durante la prueba sin carga . . . . .	216
F.30. Voltaje durante la prueba sin carga . . . . .	217
F.31. Corriente durante la prueba sin carga . . . . .	218
F.32. Amperios hora durante la prueba sin carga . . . . .	219
F.33. Energía durante la prueba sin carga . . . . .	220



# Índice de tablas

3.1. Consumo energético de los motores . . . . .	37
3.2. Consumo energético de los drivers . . . . .	37
3.3. Características de los conversores DC-DC . . . . .	40
3.4. Consumo energético de los drivers . . . . .	52
3.5. Características de la celda 26Ah . . . . .	55
4.1. Selección de Celdas a Monitorear . . . . .	64
4.2. Comandos disponibles en el LTC6802-2 . . . . .	64
4.3. Registros de configuración del LTC6802-2 . . . . .	66
4.4. Memoria de bits . . . . .	66
4.5. Valores del Registro CDC . . . . .	67
5.1. Resistencia interna de las Celdas . . . . .	79
5.2. Características de los sensores de corriente . . . . .	92
5.3. Voltajes de las Celdas antes del Balanceo . . . . .	92
5.4. Voltajes de las Celdas luego del Balanceo . . . . .	94
A.1. Registros de Lectura de Voltaje de Celdas . . . . .	126



A.2. Registros de Temperatura . . . . .	126
B.1. Registros de Lectura de Voltaje de Celdas . . . . .	128
B.2. Valores de voltaje máximos y mínimos para los rangos de resistencias del termistor	128
B.3. Valores de temperaturas máximos y mínimos obtenidos con los voltajes de la Tabla B.2 . . . . .	130
B.4. Valores de voltaje y corriente para la calibración del sensor de corriente . . . . .	132
B.5. Resultado de la calibración del sensor de corriente . . . . .	133
D.1. Valores cargar en los registros del LTC6802-2 . . . . .	159
D.2. Voltaje de las Celdas previo al balanceo . . . . .	162
D.3. Voltaje de las Celdas luego del balanceo . . . . .	165
D.4. Voltaje de las Celdas antes de ser descargadas . . . . .	169
D.5. Voltaje de las Celdas luego de la descarga . . . . .	169
D.6. Voltaje de las Celdas previo a la carga . . . . .	171
D.7. Voltaje de las Celdas luego de la carga . . . . .	171
G.1. Estimación del Costo unitario del Sistema al producir 1, 100 y 500 unidades . . .	222



# Índice de Algoritmos

D1. Comandos utilizados para configuración y lectura de registros . . . . .	150
D2. Función de Configuración de Registros . . . . .	151
D3. Función Prototipo de Lectura de Registros . . . . .	152
D4. Variables para la lectura de temperatura . . . . .	154
D5. Función Prototipo de Medición de Temperatura . . . . .	155
D6. Función Prototipo de Lectura de Voltajes . . . . .	156
D7. Función Prototipo de Balanceo de Celdas . . . . .	157
D8. Función Prototipo de Estado de Carga . . . . .	167
D9. Función Prototipo de Carga de Carga . . . . .	168
E1. Función de Escritura de Registros . . . . .	178
E2. Función de Lectura de Voltajes . . . . .	179
E3. Función de Lectura de Temperatura . . . . .	180
E4. Función de Balanceo de Celdas . . . . .	181
E5. Función de Estado de Carga . . . . .	182
E6. Función de Carga de Celdas . . . . .	183
E7. Función de Medición de Corriente . . . . .	184



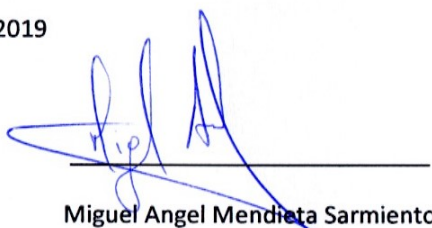


## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Miguel Angel Mendieta Sarmiento, autor del trabajo de titulación “Diseño y construcción de un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de febrero de 2019



Miguel Angel Mendieta Sarmiento

C.I: 0705963684



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Christian Oswaldo Muñoz Jimbo, autor del trabajo de titulación "Diseño y construcción de un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 15 de febrero de 2019

---

Christian Oswaldo Muñoz Jimbo

C.I: 0105618052



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Miguel Angel Mendieta Sarmiento en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y construcción de un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de febrero de 2019



Miguel Angel Mendieta Sarmiento

C.I: 0705963684



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Christian Oswaldo Muñoz Jimbo en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño y construcción de un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 15 de febrero de 2019

---

Christian Oswaldo Muñoz Jimbo

C.I: 0105618052



# Dedicatoria

## **A mis padres.**

Por haberme dado su amor y apoyo desde el momento en el que nací, guiándome por el camino correcto durante toda mi vida para convertirme en la persona que soy hoy.

Por los momentos en los cuales estuve a punto de rendirme, en los cuales ellos nunca perdieron la fe en mí, recordándome quien era yo e indicándome que no me diera por vencido.

Por eso y muchas cosas más les agradezco con todo mi corazón, y aunque ya no estén conmigo se que continúan cuidándome desde el cielo.

**Miguel Mendieta S.**



# Dedicatoria

**A mis padres** Hipólito Vicente y Digna Susana por todo el amor, ejemplo y apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida estudiantil.

**A mis hermanos** Wilson, Edwin y Danny por estar siempre presentes y ser ese ejemplo e inspiración para seguir adelante.

**A Verónica** por brindarme su amor y compañía a lo largo de mi carrera universitaria, gracias por ser mi motivación.

A todos mis familiares y amigos que con sus palabras de aliento, amistad y buena vibra me acompañaron durante mi carrera universitaria.

**Christian Muñoz**



# Agradecimientos

Al Dr. Luis González, nuestro director de tesis, por el apoyo, consejos, paciencia y grandes horas de dedicación brindados hacia nosotros durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Ismael Minchala, quien hizo posible la realización de este y demás proyectos asociados al exoesqueleto.

A mis hermanas por darme su amor y por el apoyo que me brindaron a lo largo de mi carrera universitaria, permitiéndome culminar mis estudios.

A mis amigos, por siempre estar allí, en los buenos y malos momentos.

Finalmente, a todas aquellas personas que me prestaron su ayuda en cualquier problema que tuve, sin importar lo pequeño o grande que este fuera.

**Miguel Mendieta S.**



# Agradecimientos

**A Dios** por brindarme ese regalo tan maravilloso que es la vida.

**A mis padres** por ser el principal motor para cumplir mis metas y mis sueños.

**A mis hermanos, familiares y amigos cercanos**, gracias por ayudarme a alcanzar mi meta profesional.

**A Verónica y su familia** por la ayuda, el apoyo y paciencia brindada en el desarrollo de este trabajo de titulación y durante los 9 años de relación, gracias por ser esa personal especial en mi vida.

**A Miguel** por ser un verdadero amigo y juntos culminar este trabajo con éxito.

**Al Ing. Luis González** por sus enseñanzas y observaciones a lo largo de la carrera universitaria y desarrollo de este trabajo.

**Al Ing. Ismael Minchala** por la confianza y el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

**A la Universidad de Cuenca**, especialmente a los docentes de la Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, por sus enseñanzas y conocimientos compartidos dentro y fuera de las aulas. Por último y no menos importante, a todas las amistades formadas a lo largo de mi vida universitaria, gracias por esos buenos momentos compartidos.

**Christian Muñoz**





# Abreviaciones y Acrónimos

**AC** Alternating Current (Corriente Alterna). [21](#), [70](#)

**ADC** Analog to Digital Converter (Convertidor Analógico Digital). [41](#), [42](#), [58](#), [60](#)

**Ah** Amperios-hora. [9](#), [10](#), [109](#), [111](#)

**BMS** Battery Management System (Sistema de Gestión de Baterías). [2](#), [13](#), [14](#), [25–28](#), [30](#), [38](#),  
[41](#), [57](#), [79](#), [121](#), [149–152](#), [155](#), [156](#), [158](#)

**CI** Circuito Integrado. [41–44](#), [57](#), [60](#), [62](#), [80](#), [82](#), [89](#), [121](#), [122](#), [124](#), [145–147](#), [150](#), [153](#)

**CPHA** Clock Phase (Fase de reloj). [33](#), [34](#), [46](#), [68](#), [149](#)

**CPOL** Clock Polarity (Polaridad de reloj). [33](#), [34](#), [46](#), [68](#), [149](#)

**CS** Chip Select (Selección de chip). [32–34](#)

**DC** Direct Current (Corriente Directa). [2](#), [21](#), [24](#), [31](#), [37–40](#), [71–73](#), [83](#), [84](#), [145](#), [175](#)

**EV** Vehículo Eléctrico. [29](#)

**GND** Ground (Tierra). [39](#), [60](#)

**HEV** Vehículo Eléctrico Híbrido. [29](#)

**I2C** Inter-Integrated Circuits (Circuito inter-integrado). [41](#)

**ID** Identificador. [59](#), [151–153](#), [155](#)

**Li-Ion** Ion Litio. [7–9](#)

**MISO** Master In Slave Out (Entrada del maestro, salida del esclavo). [33](#), [149](#)

**MOSI** Master Out Slave In (Salida del maestro, entrada del esclavo). [33](#), [149](#)

**MSB** Most Significant Bit (Bit más significativo). [33](#), [46](#)

**NMC** Nickel-Manganese-Cobal (Níquel manganeso y cobalto). [53](#)

**PCB** Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso). [45](#), [81](#), [85](#), [91](#), [92](#), [145–147](#), [165](#), [166](#),  
[175](#)



**RS232** Recommended Standard 232 (Estándar Recomendado 232). [31](#), [46](#), [48](#), [71](#), [89](#), [152](#), [161](#)

**SAR** Successive Approximation Register (Registro de Aproximación Sucesiva). [60](#)

**SCLK** Serial Clock (Reloj Serial). [33](#), [149](#)

**SoC** State of Charge (Estado de carga). [12](#), [13](#), [28](#), [79](#), [122](#)

**SoH** State of Health (Estado de salud). [28](#), [79](#)

**SPI** Serial to Peripheral Interface (Interfaz serie a periférico). [2](#), [30](#), [32–35](#), [43](#), [44](#), [46](#), [59](#), [60](#),  
[63](#), [68](#), [69](#), [71](#), [80](#), [82](#), [89](#), [147](#), [149](#)

**SS** Select Slave (Seleccionar Esclavo). [32](#), [33](#), [149](#), [150](#)

**Wh** Wattios-hora. [96](#), [100](#), [102](#), [105](#), [109](#), [111](#), [114](#), [117](#)



## Capítulo 1

# Introducción

Este capítulo incluye el problema a tratar y la solución propuesta por este proyecto. Se incluye el alcance, así como los objetivos generales y específicos que se desean cumplir al finalizar este trabajo de titulación

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*



## 1.1. Introducción

Un exoesqueleto es un dispositivo de rehabilitación [1] que debe poseer cierto nivel de autonomía energética, ya que al proporcionar movilidad a una persona no tendría sentido estar conectado constantemente a una toma eléctrica. [2] Un banco de baterías puede proporcionar la energía requerida, sin embargo, utilizar únicamente un grupo de celdas para alimentar un equipo de alto consumo no es lo ideal, pues es necesario monitorear constantemente el banco de baterías con el fin de evitar sobre o bajas tensiones, lo cual a la larga se traduce como reducción del ciclo de vida de las celdas.

Los sistemas de gestión de baterías o **BMS** (del inglés Battery Management System) están diseñados para monitorear, cargar, medir y visualizar o almacenar la información de cada una de las celdas de un banco de baterías. Para medir las celdas, incorporan técnicas de aislamiento galvánico usando métodos que emplean transformadores o tecnología de fibra óptica. [3] Estos **BMS** son costosos, complejos y voluminosos. Se necesita un sistema compacto y económico para medir celdas individuales en un banco de baterías.

Este trabajo presenta la creación de un sistema de gestión de energía portátil y económico, el cual no sólo supervisa el comportamiento de las celdas del banco de baterías, sino que también proporciona salidas de 3.3 V y 5 V a partir del voltaje del banco de baterías. La parte principal del sistema está conformado por el circuito integrado LTC6802-2 el cual es un monitor de baterías de alta precisión [4], y un microcontrolador Arduino Nano que comanda a este integrado mediante comunicación **SPI**.

## 1.2. Antecedentes

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca alineada con los proyectos de investigación que permiten mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, actualmente se encuentra realizando proyectos de investigación en el área de biomédica, uno de ellos un prototipo de exoesqueleto a cargo de un conjunto de investigadores del DEET. El propósito de este proyecto es permitir el movimiento autónomo a una persona con limitaciones de motrices[5]. El sistema de control del exoesqueleto se desarrolla mediante algoritmos de control adaptativos que permiten ajustarse a diferentes patrones de marcha y requerimientos puntuales del paciente, en función de las limitaciones que éste presente.

El exoesqueleto en desarrollo está formado en principio por: seis motores Maxon **DC**, seis drivers EPOS 4 COMPACT 50/8 CAN encargados del movimiento mecánico, un Raspberry Pi encargado del control y un casco de lectura de ondas cerebrales. Todos los dispositivos



antes mencionados serán alimentados con energía eléctrica a partir de un banco de baterías de tipo ion litio con celdas de 3.7 V y capacidad de 26 Ah. En estudios previos el conjunto de los componentes del exoesqueleto consumen una potencia de 460 W aproximadamente a su máxima potencia, en vista a esto es necesario el diseño e implementación de una fuente de alimentación de energía eléctrica portátil, que proporciona los voltajes y corrientes necesarios a partir de las baterías antes mencionadas.

### 1.3. Alcance

Diseñar e implementar el sistema de gestión de energía para el "prototipo de exoesqueleto para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores". La etapa de desarrollo del proyecto involucra el montaje de las baterías y el desarrollo de reguladores de tensión para todos los niveles de voltaje del prototipo de exoesqueleto. Adicionalmente, se desarrollará un contenedor que permita dar movilidad a todo el sistema.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de gestión de energía para aplicaciones de asistencia a la movilidad en extremidades inferiores.

#### 1.4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la energía requerida para los componentes del sistema de asistencia a la movilidad de extremidades inferiores a diseñar.
- Diseñar e implementar un sistema de gestión de energía portátil.
- Implementar un algoritmo de estimación de nivel de carga de las baterías.
- Diseñar una mochila ergonómica que sirva de contenedor para el sistema de gestión de energía y el banco de baterías.



## Capítulo 2

# Marco Teórico

En este capítulo se realiza una revisión teórica de los componentes que conformarán el sistema de gestión de energía como son: el sistema de alimentación (baterías de Ion Litio), presentación y configuraciones, tipos de balanceo de carga en bancos de baterías, tipos de estimación de carga; sistemas de gestión de baterías, sus principales funciones; la electrónica asociada al proyecto: motores, drivers, controladores; y por último la comunicación a utilizarse entre los dispositivos.

## 2.1. Exoesqueleto

Un exoesqueleto es un mecanismo estructural externo, cuyas articulaciones y enlaces corresponden a las del cuerpo humano, un exoesqueleto robótico es un sistema electromecánico que consiste en una estructura externa el cual se acopla a determinada extremidad o zona del cuerpo humano con la finalidad de reducir el esfuerzo físico producido por la persona para el movimiento de esta. Los exoesqueletos permiten la transferencia directa de energía mecánica y el intercambio de información [6]. Además, un exoesqueleto debe ser ajustable y adaptable con el propósito de alinear sus articulaciones con los centros de rotación de las articulaciones del cuerpo humano [2]. Las principales áreas de aplicación son: la milicia, la industria y la medicina, esta última con el propósito de brindar ayuda a pacientes que realizan terapias de rehabilitación de extremidades superiores e inferiores [7]. La Figura 2.1, muestra el ejemplo de un exoesqueleto de dos grados para extremidades inferiores, similar al que se desea desarrollar con el proyecto antes mencionado.

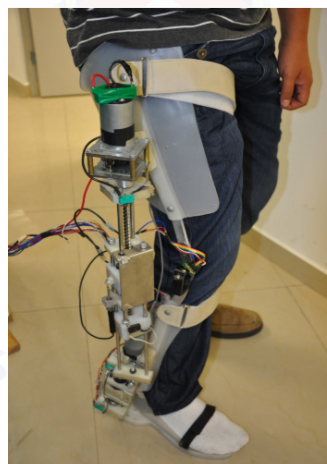


Figura 2.1: Exoesqueleto de dos grados de libertad para asistir la pierna derecha  
Fuente:[7]

## 2.2. Sistema de Almacenamiento (Baterías de Ion Litio)

Dentro de los principales componentes que involucra un exoesqueleto se encuentra los sistemas de provisión de energía eléctrica, pues deben soportar energéticamente la operación durante el tiempo de diseño. Existen distintos tipos de sistemas de almacenamiento, entre los cuales destaca las baterías de sistema Ion Litio por su densidad energética útil en sistemas portátiles,

el esquema utilizado presenta una colección de celdas conectadas en serie, formando un único módulo físico el cual provee de altos voltajes [8]. Se puede definir una celda como el elemento básico de una batería, el cual provee voltajes pequeños [8]; el banco de baterías utilizado para la elaboración de este trabajo provee 3.7 V. Las celdas recargables de Ion Litio tienen una alta densidad de energía y potencia, son la opción estándar de muchos productos electrónicos como: computadores portátiles, teléfonos celulares, y en los últimos años utilizadas como fuente de energía para vehículos eléctricos.

### 2.2.1. Presentaciones

En la Figura 2.2, se observa las diferentes presentaciones de las celdas de Ion Litio, las cuales pueden encontrarse de las siguientes formas:

1. Cilíndricas cortas.
2. Cilíndricas largas.
3. Prismáticas.
4. En forma de Bolsa (Pouch).

Cada una con características particulares; en el caso de estudio se utiliza la de tipo Pouch por su facilidad de adecuación dentro de la estructura de transporte.

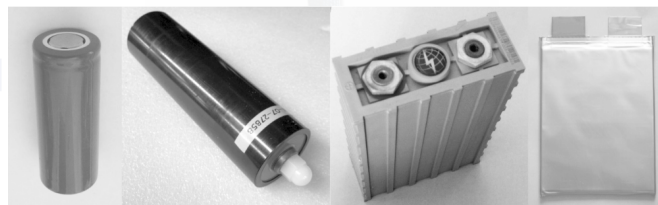


Figura 2.2: Presentaciones de las celdas de Ion-Litio  
Fuente:[8]

### 2.2.2. Composición química de las baterías de Ion Litio

Las celdas de Ion Litio (Li-Ion) son celdas recargables que utilizan reacciones de intercalación de litio en ambos electrodos; los iones de litio viajan entre los dos electrodos en un llamado marco de mecedora. Este tipo de celdas utiliza electrolito líquido nano-acuoso, excepto las celdas de Litio Polímero, las cuales utilizan polímero o electrolito en gel [8].



Existen diferentes tipos de celdas **Li-Ion**, son nombradas de acuerdo a su composición química, entre las más conocidas tenemos:

- $\text{LiCoO}$ : Estándar de litio-cobalto-óxido
- $\text{LiMnNiCo}$ : Litio-manganeso-níquel-cobalto
- $\text{LiFePO}_4$  y  $\text{Li}_2\text{FePO}_4\text{F}$ : Nanofosfato / fosfato de litio-hierro / ferrofosfato de litio
- $\text{LiMnO}_2$ : Óxido de manganeso de litio
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ : Titanato de litio
- $\text{LiMn}_2\text{O}$ : Óxido de manganeso de litio
- $\text{LiNiO}_2$ : litio-níquel-óxido

En la Figura 2.3 se observa que la densidad de potencia y energía varía de acuerdo a la composición química de la celda, así como su voltaje nominal.

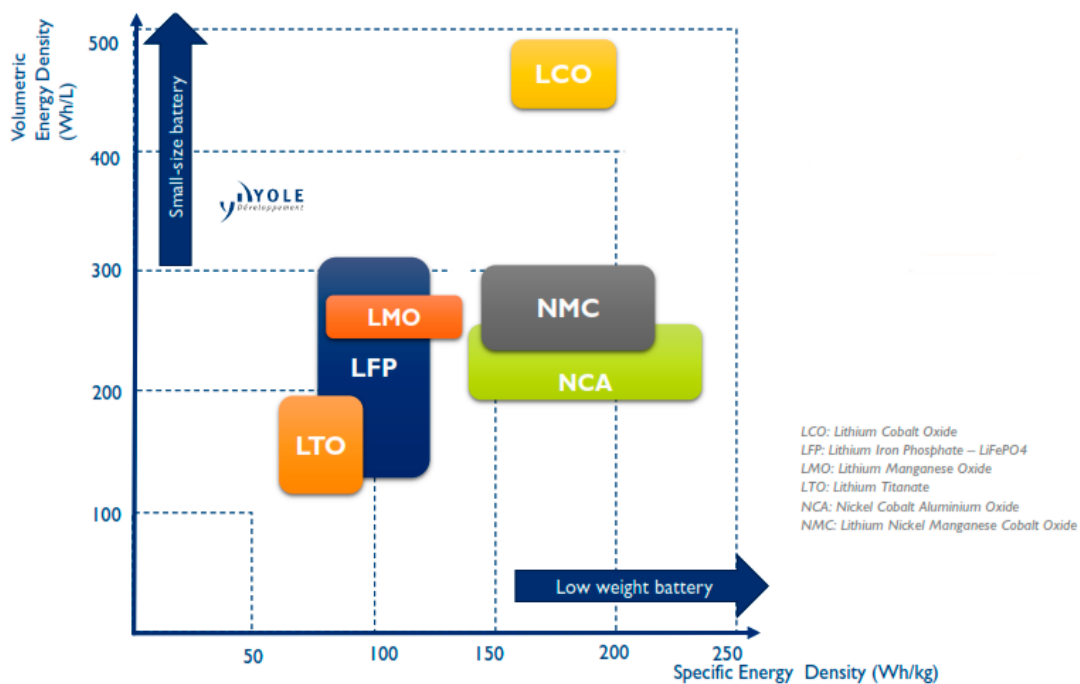


Figura 2.3: Energía específica vs. densidad de energía de las tecnologías de Ion-Litio

Fuente:[9]



### 2.2.3. Seguridad de las baterías de Ion Litio

Las celdas de **Li-Ion** tienen un área operativa segura, denominada SOA, por sus siglas en inglés (safe operating area), la cual es muy estrecha. Trabajar fuera de esta área produce un deterioro acelerado de la vida útil de la celda, deformaciones de la celda, sobrecalentamiento (por voltaje, sobre corriente o calor) y explosiones que pueden ocasionar daños físicos a la persona que utiliza dicha celda.

La SOA de una celda está dada por 3 parámetros: la corriente, la temperatura y el voltaje. Sobrecargar las celdas por encima del voltaje máximo determinado puede producir destrucción de la misma. Si la celda se descarga fuera de un cierto rango de temperatura, su vida útil se verá reducida. Al contrario, si excede su temperatura límite puede experimentar una fuga térmica y prenderse fuego [8].

En cuanto a recomendaciones para su manipulación: no se debe mezclar celdas de diferente composición química; se debe tener especial cuidado con los objetos metálicos, especialmente si las conexiones de un banco de celdas se encuentran desprotegidos; para baterías que sobrepasen los 40 V se deben utilizar implementos de seguridad como gafas protectoras y guantes aislados para su manipulación; en caso de que se presente alguna situación de emergencia se debe contar con los equipos necesarios de seguridad para evitar que el problema pase a mayores.

### 2.2.4. Eficiencia de las baterías de Ion Litio

Las baterías de **Li-Ion** tienen resistencia interna muy baja, con lo cual, el desgaste de energía, por calor interno, es muy pequeño [8].

La eficiencia energética de una celda se ve afectada por varias razones:

- Cuando la carga demanda corrientes más elevadas que la suministrada por la batería.
- Temperatura de trabajo de la batería, a mayor temperatura la batería se degrada a mayor velocidad.
- Durante la carga de la batería, parte de la energía se disipa en calor.
- Resistencia de la carga.
- Vida útil de la batería.

Cuando la resistencia de la carga es igual a la resistencia interna de la batería, esta entrega su máxima potencia, de la cual la mitad se desperdicia en calor y la otra mitad es entregada a la carga [8], esto por un período de tiempo muy corto, ya que la batería se degradaría y su temperatura alcanzaría niveles peligrosos.

Con respecto a los ciclos de carga, las baterías de ion-litio tienen una eficiencia entre el 85 % a 97 % [8], es decir, la mayor parte de la energía que almacena la batería es entregada al momento de la descarga, siempre que se completen ciclos de carga y descarga lo suficientemente cortos para que la auto descarga no sea problema [8].

Las baterías de [Li-Ion](#) tienen una vida útil más larga que otras baterías electro-químicas [8]. Sin embargo, tienen una vida útil limitada, como es el caso de las baterías utilizadas en computadoras portátiles y celulares.

La vida útil de una batería es el tiempo en el cual puede almacenar al menos el 70 % de su capacidad energética total, los factores como: el tiempo de uso de esta y los ciclos de carga y descarga que ha tenido, alargan ó acortan la vida útil de una batería. Mientras más tiempo de uso y ciclos de carga y descarga tenga, la capacidad de esta se verá reducida, esta reducción es permanente, así como existirá un leve aumento en la resistencia interna de la batería. Es recomendable, en bancos de baterías, trabajar con baterías con una vida útil similar para evitar problemas de ineficiencia.

## 2.3. Tipos de conexiones de celdas en los bancos de baterías

Como se mencionó anteriormente, una batería es un conjunto ó colección de celdas conectadas en serie/paralelo no estándar agrupada básicamente para alcanzar el voltaje y capacidad (Amperios-hora [Ah](#)) de interés. Además de la conexión en serie/paralelo existen otros tipos de configuraciones adicionales para la conexión de las celdas, las cuales se mencionan a continuación:

### 2.3.1. Conexión en serie

Utilizado cuando se necesita voltajes más elevados que el proporcionado por una celda, la capacidad ([Ah](#)) de las celdas se mantiene. La conexión de las celdas se indica en la Figura 2.4.

Las fallas más comunes en este tipo de conexión son debido a la falla de una celda, ya que provocaría la falla total de la batería, para evitar esto, en empaques de celdas grandes, se coloca un interruptor entre las celdas, el cual sirve de bypass si alguna de estas llegara a fallar, permitiendo que siga fluyendo la corriente con un voltaje menor.

Otra desventaja de este tipo de conexión se da por el voltaje de operación de cada celda, estas

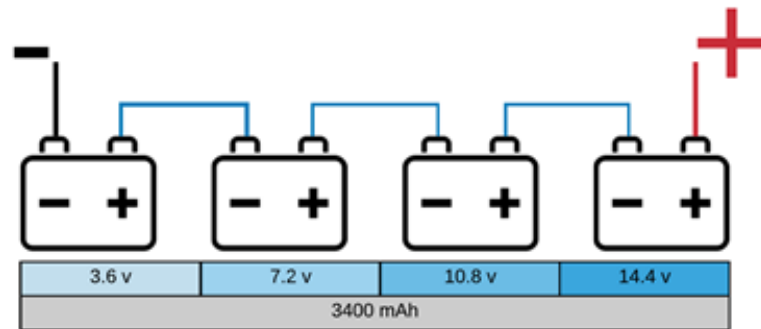


Figura 2.4: Conexión en serie de 4 celdas  
Fuente: Autores

no sufren un desgaste uniforme, por lo cual, basta que al menos una celda llegue a su voltaje de operación mínimo para que toda la batería no pueda ser utilizada, provocando un apagado prematuro del mismo, por esto es fundamental contar con un sistema de balanceo de carga, así como de supervisión de cada celda para evitar estos tipos de fallos prematuros en el banco de baterías.

### 2.3.2. Conexión en paralelo

Este tipo de conexión es utilizado cuando se requieren corrientes elevadas que no pueden ser cubiertas por las celdas comerciales. La mayoría de las celdas ion-litio permiten configuraciones en paralelo con pequeños efectos colaterales [10]. En este tipo de conexión, el voltaje de celda se mantiene, mientras que la capacidad (Ah) y el tiempo de funcionamiento se multiplica por el número de celdas que se coloquen. La forma de conexión de las celdas se indica en la Figura 2.5.

Una de las fallas más comunes en esta conexión se da cuando una celda desarrolla alta resistencia, produciendo que la capacidad de la batería disminuya. Por lo contrario, si la celda produce un cortocircuito eléctrico, la celda con esta falla consumirá energía de las otras celdas ocasionando desde una descarga acelerada de la batería hasta peligro de fuego de la celda [10]. Estas fallas se pueden evitar aislando la celda mediante un fusible de protección.

### 2.3.3. Conexión serie-paralelo

Este tipo de conexión fusiona los mencionados con anterioridad permitiendo formar baterías con voltajes superiores a los de una celda y con altas capacidades de corriente. Con este tipo de conexión se obtiene mayor flexibilidad de diseño pudiendo modificar tanto el voltaje como la

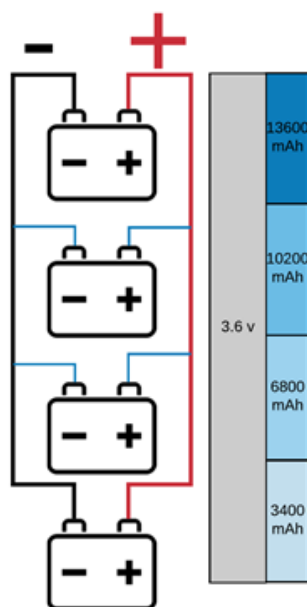


Figura 2.5: Conexión en paralelo de 4 celdas  
Fuente: Autores

capacidad (Ah) de acuerdo a las necesidades energéticas. Las formas de conexión de las celdas se indican en la Figura 2.6.

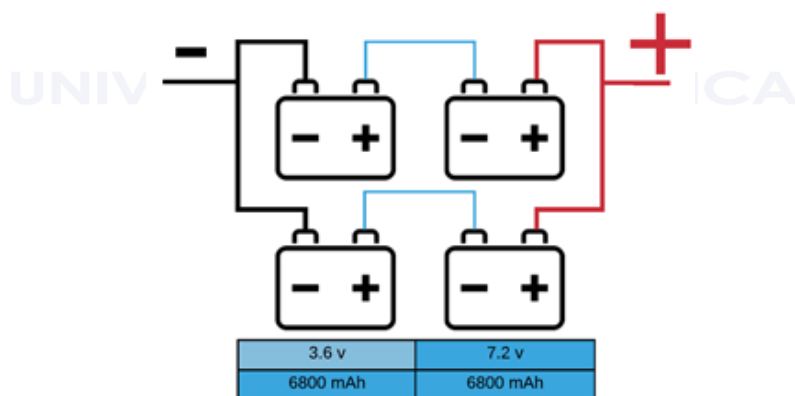


Figura 2.6: Conexión serie/paralelo de 4 celdas  
Fuente: Autores

Las celdas de ion litio son las más utilizadas para este tipo de conexión, siempre y cuando se cuente con un sistema de monitoreo para que la batería se mantenga dentro de los límites de voltaje y corriente [10].

## 2.4. Estimación del estado de carga en baterías de Ion Litio

El estado de carga (State of Charge **SoC**) de una batería o celda es el porcentaje de su capacidad total de energía disponible en determinado instante. Debido a factores como: el voltaje de carga, temperatura, velocidad de descarga; no existe una manera de medir el estado de carga directamente, por lo cual, se define como una estimación del estado de carga en lugar de medida [8].

Entre los métodos más utilizados para la estimación del **SoC** se tienen:

### 2.4.1. Estimación por voltaje

Este método utiliza la relación que existe entre la tensión de la batería y la capacidad disponible de la misma [11]. Este método puede ser impreciso debido a que los factores externos como la temperatura, la corriente y los materiales que constituyen las celdas afectan al voltaje.

Conocer la forma en la que la temperatura y la corriente afecta al voltaje permite compensar esos efectos, permitiendo que este método sea utilizado en diversos tipos de baterías.

Debido a la curva del voltaje frente al estado de carga de una batería de ion-litio, presentado en la Figura 2.7; este método de estimación sólo es eficiente cuando la batería se encuentra cargada al (100 %) o casi descargada (10 %), debido a que su voltaje permanece casi constante entre el 20 % y 80 % del estado de carga [8].

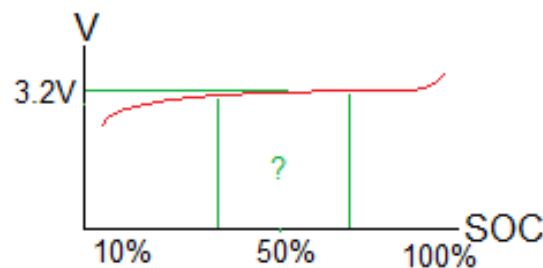


Figura 2.7: Curva de voltaje vs. estado de carga de una batería de Ion-Litio  
Fuente:[11]

### 2.4.2. Estimación con contador de Coulombs

Este método mide la corriente que circula por la batería. De manera que, si una batería se encuentra al 0% de SoC y se comienza a cargar, el contador de culombios empezará a incrementarse. Comparando este contador con la capacidad total de la batería se puede conocer el estado actual de la carga [11].

El método de contador de Coulombs se define por la ecuación 2.1 [11]:

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_0+t} I_{bat}(d\tau) \cdot 100\% \quad (2.1)$$

En donde:

- $SoC(t_0)$  es el estado inicial de carga.
- $C_n$  es la capacidad nominal.
- $I_{bat}$  es la corriente de carga y descarga.

Entre los inconvenientes que se presentan con este método están:

- Error del valor inicial: Se desconoce del valor de SoC inicial, si el valor es impreciso, afecta a las estimaciones siguientes.
- Errores acumulados debido a la integral, perdiendo gradualmente precisión.

## 2.5. Balanceo ó Ecuálización de celdas

El balanceo de la carga de las celdas es el aspecto más importante de un BMS debido a que las celdas que constituyen un banco de baterías no son idénticas debido a los procesos de fabricación de las mismas. Esto conlleva a que exista una descarga/carga desequilibrada de las celdas, el balanceo o ecuálización tiene como finalidad mantener las celdas en iguales condiciones, es decir, lograr una carga/descarga uniforme. Una buena gestión del balanceo permitirá completar los ciclos de carga y descarga óptimamente de modo que se aproveche la capacidad energética disponible en la batería [8].

Las causas más comunes de un desbalance de carga:

- Montaje de celdas con distinto nivel de carga.
- Montaje de celdas con distinto historial de ciclado.

- Por las tolerancias de fabricación de las celdas.
- Por el propio sistema [BMS](#).

Estos factores reducen la capacidad real de la batería, ya que, si una celda llega a su voltaje de operación mínimo, la batería debería dejar de utilizarse para evitar daños a dicha celda; por lo cual el balanceo es un punto clave en el desarrollo de este proyecto. En el siguiente punto se tratará los diferentes tipos de circuitos para el balanceo de carga en las celdas de una batería.

## 2.6. Tipos de Balanceo de celdas

El balanceo de celdas se clasifica en 2 grupos: activos y pasivos; en los cuales existen diversos métodos, los cuales se mencionan en el cuadro de la Figura 2.8.

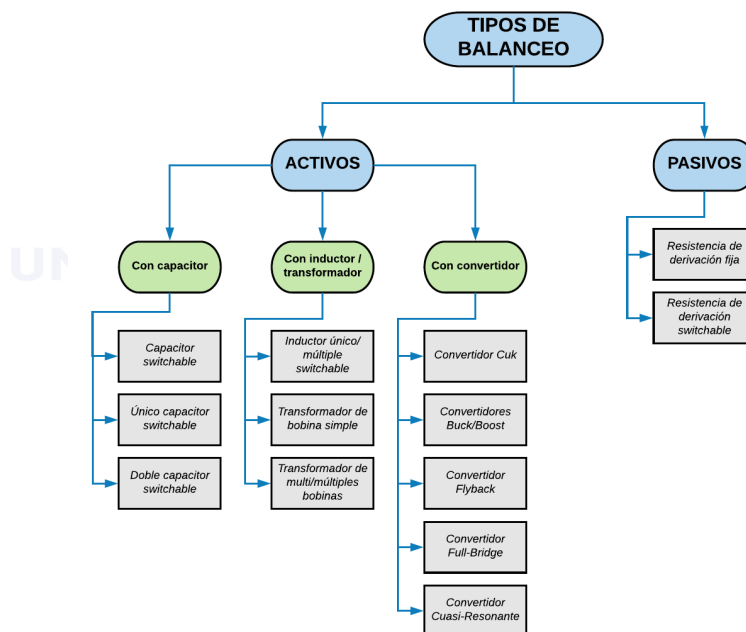


Figura 2.8: Tipos de Balanceo de carga en baterías de Ion-Litio  
Fuente: Autores

A continuación se describe brevemente cada uno de estos métodos:



### 2.6.1. Balanceo Pasivo

Se denomina balanceo pasivo ya que estos métodos actúan removiendo el exceso de carga de las celdas más cargadas mediante dispositivos pasivos (resistencias), hasta alcanzar el valor de la celda con menor carga. Existen 2 métodos de balanceo pasivo: resistencia fija y resistencia conmutable.

- **Resistencia de derivación fija**

En este método se conecta una resistencia en paralelo a cada celda, provocando una descarga continua de todas las celdas, el valor de resistencia se ajusta para limitar el voltaje de cada celda. Este método es utilizado en baterías de plomo y de níquel. La Figura 2.9 a) muestra la topología de conexión de este método.

- **Resistencia de derivación conmutable**

Similar al método anterior, con la modificación de que la descarga no es continua, debido a la adición de un interruptor en serie a la resistencia. La forma de conexión se indica en la Figura 2.9 b).

Este método puede operar en 2 modos:

- Un primer modo igual al método anterior, descarga continua.
- Un segundo modo de detección, en donde se controlan los voltajes de las celdas. Cuando el sistema detecta un desbalance de carga, escoge la celda que debe descargarse. Este modo es más eficiente que el anterior y uno de los más utilizados en baterías de ion litio.

Algunas desventajas de estos métodos son:

- La disipación de sobrecarga se realiza mediante calor, lo cual hace indispensable el monitoreo de la temperatura de las celdas a fin de evitar cualquier daño.
- La descarga de las celdas se realiza de una manera lenta, debido a que, si existen descargas bruscas, pueden reducir la vida útil de las celdas.

### 2.6.2. Balanceo Activo

En este tipo de balanceo se transfiere carga desde las celdas con más carga hacia las celdas con menos carga de la batería. Se utilizan diferentes componentes como: condensadores, inductores, transformadores, convertidores, etc. A continuación, se describe brevemente cada uno de estos métodos.

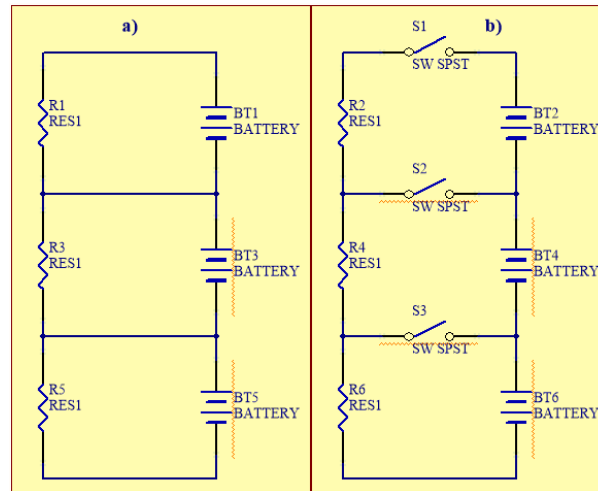


Figura 2.9: Balanceo pasivo: a) resistencia de derivación fija, b) resistencia de derivación conmutable

Fuente: [12]

#### 2.6.2.1. Utilizando condensadores como sistema de respaldo temporal

Para este tipo de ecualización se utilizan condensadores, como dispositivos externos de almacenamiento de energía, para el traspaso de energía entre celdas en una batería. Se tienen 3 tipos de conexión: condensador conmutable, condensador único conmutable, condensador doble conmutable o de doble capa [12].

- **Condensador conmutable**

Utiliza  $n - 1$  condensadores y  $2 * n$  interruptores para balancear  $n$  celdas. La forma de conexión se indica en la Figura 2.10 a). El control de este balanceo se basa en 2 posiciones del condensador: almacenando energía y suministrando energía, por lo que, el control de estos estados no requiere de inteligencia adicional.

- **Condensador único conmutable**

En este tipo de balanceo se utiliza un único condensador, pero es necesario  $n+5$  interruptores para el balanceo de  $n$  celdas. La Figura 2.10 b) indica la forma de conexión. Para realizar el balanceo se conmuta los interruptores de la celda con mayor carga y de la celda con menor carga. El tiempo de balanceo es mucho mayor al de los métodos anteriormente mencionados [12].

- **Condensador doble conmutado**

Combina los métodos anteriormente descritos para el balanceo. La forma de conexión

comúnmente utilizada se muestra en la Figura 2.10 c). La ventaja de este método con respecto a los anteriores es la reducción del tiempo de balanceo en un 75 % con respecto al método de condensador conmutable.

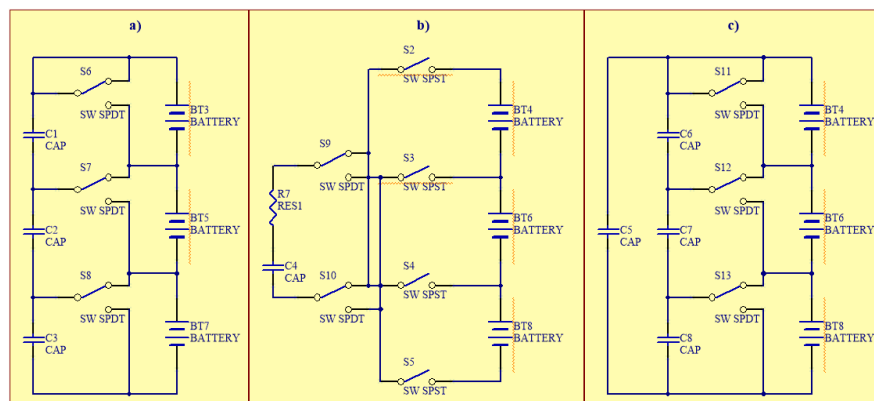


Figura 2.10: Balanceo activo utilizando condensadores. a) condensador conmutable, b) condensador único conmutable, c) doble condensador conmutable.

Fuente: [12]

#### 2.6.2.2. Utilizando inductores/transformadores

De manera similar al punto anterior, se utiliza inductores o transformadores para transportar energía de una celda, o grupo de celdas con mayor carga hacia la celda o celdas con menor carga. A continuación, se describe los métodos de balanceo utilizando inductores o transformadores.

Las desventajas principales de estos métodos son: el costo de implementación e introducción de pérdidas debido al magnetismo producido por los transformadores [12].

- **Inductor único/múltiple conmutable**

Utiliza uno o más inductores conmutados para el balanceo de las celdas, como muestra la Figura 2.11.

La configuración de un único inductor, presentado en la Figura 2.11 a), transfiere la carga de la celda con mayor carga hacia la celda con menor carga mediante interruptores ubicados en cada celda. Se tiene un interruptor de carga y descarga en cada celda. En la configuración de múltiples inductores, presentado en la Figura 2.11 b), se tiene n-1 inductores para n celdas a balancear. El control se encarga de sensar la diferencia de voltaje

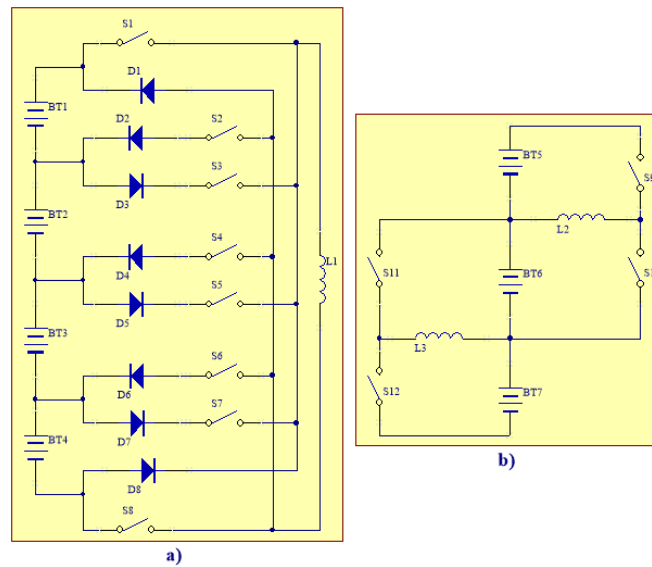


Figura 2.11: Balanceo activo utilizando inductores. a) configuración con único inductor, b) configuración con múltiples inductores.

Fuente: [12]

entre 2 celdas adyacentes, utiliza un control PWM para la conmutación de las celdas, disminuyendo el tiempo de balanceo.

- **Transformador de bobina simple**

Utiliza un transformador e interruptores para el balanceo de las celdas. Se utiliza 2 técnicas para el balanceo: La primera se denomina “pack-to-cell” [12], en la cual se transfiere la energía de la batería a través del transformador hacia las celdas con menor carga utilizando interruptores, la topología utiliza se indica en la Figura 2.12.

La segunda técnica se denomina “cell-to-pack” [12], en donde se transfiere energía desde la celda de mayor carga hacia toda la batería.

- **Transformador de multi/múltiples bobinas**

Este método puede utilizar las topologías mostradas en la Figura 2.13. Este método se basa en un transformador con un bobinado primario y múltiples bobinados secundarios, uno por celda. Se tiene 2 tipos de conexión: flyback, Figura 2.13 a), y forward, Figura 2.13 b).

En la conexión flyback, se conmuta la bobina primaria, con lo cual, cuando el transformador se encuentra activo, almacena energía; cuando este es desconectado, la energía se transfiere a los bobinados secundarios del transformador, induciendo más corriente en los bobinados conectados a las celdas con menor carga [12].

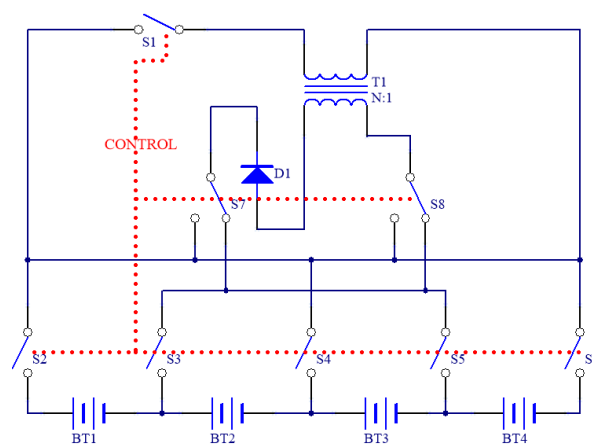


Figura 2.12: Balanceo activo utilizando un transformador de bobina simple.

Fuente: [12]

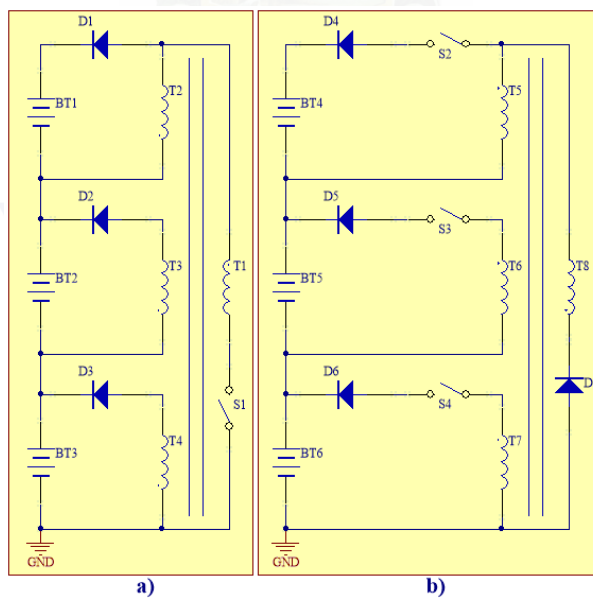


Figura 2.13: Balanceo activo utilizando transformador multi bobinas. a) conexión flyback, b) conexión forward.

Fuente: [12]

En la conexión forward, los voltajes de cada celda son censados, si existe diferencia de voltaje, se conmuta la celda con mayor carga, y se induce corriente al bobinado primario el cual transfiere energía al resto de celdas. Este circuito es muy complejo y costoso de implementar, además de presentar problemas de saturación [12].

Otro método de balanceo es utilizar múltiples transformadores,  $n$  transformadores para  $n$  celdas, similar al método utilizado con condensadores. La Figura 2.14 muestra esta forma de conexión.

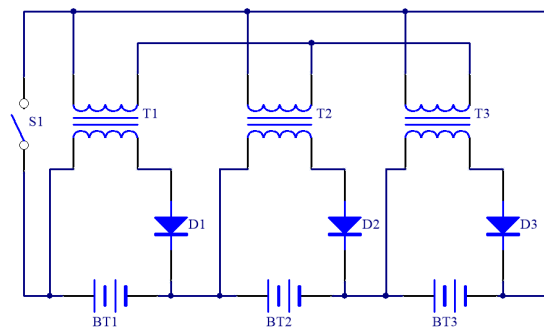


Figura 2.14: Balanceo activo utilizando múltiples transformadores.

Fuente: [12]

Esta técnica divide las celdas de la batería en grupos, con lo cual reduce el estrés en los dispositivos de conmutación [12].

### 2.6.2.3. Balanceo utilizando convertidores

El balanceo de celdas utilizando convertidores se caracterizan por proporcionar un control total del proceso de ecualización. La gran desventaja de estos métodos es el alto costo y alta complejidad de implementación.

- **Convertidor Cuk**

El convertidor Cuk utiliza un ecualizador individual de celda (ICE por sus siglas en inglés) con el cual balancea a 2 celdas adyacentes. Cada ICE está conformado por 2 inductores, 2 interruptores y un condensador, la topología de conexión se muestra en la Figura 2.15.

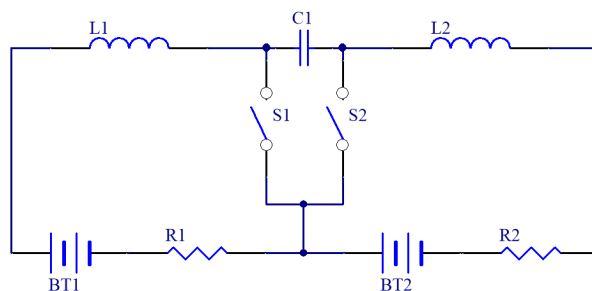


Figura 2.15: Balanceo activo utilizando un convertidor Cuk.

Fuente: [12]

El convertidor Cuk transfiere energía entre las 2 celdas adyacentes mediante la conmutación de los interruptores. El tiempo de equalización es de acorde al número de celdas que conforman la batería.

- **Convertidores Buck y/o Boost**

El convertidor Buck, presentado en la Figura 2.16, transfiere energía de la batería a las celdas con menor carga, esto se indica en la Figura 2.16; mientras que el convertidor Boost transfiere la energía de la celda con mayor carga hacia un elemento de almacenamiento o una batería auxiliar, y transfiere esta energía hacia las celdas con menor carga. En la Figura 2.17, se presenta la conexión de un convertidor Buck-Boost para el balanceo de las celdas.

- **Convertidor Flyback**

La forma de conexión de este convertidor se muestra en la Figura 2.18. Puede trabajar como convertidor unidireccional o bidireccional. Si se utiliza como unidireccional, cuando Q1 conecta la bobina primaria a la celda, la energía es almacenada en el transformador, y es transferida cuando Q1 desconecta la bobina. En el modo bidireccional esta energía es transferida hacia toda la batería [12].

- **Convertidor tipo Rampa**

Similar al método que utiliza transformador de multi bobinas, sin embargo, utiliza una bobina secundaria para 2 celdas, esto se observa en su forma de conexión presentada en la Figura 2.19. Este convertidor consta de 2 ciclos de trabajo, en el primer ciclo carga las celdas impares que tengan la carga más baja, análogamente en el siguiente ciclo carga las celdas pares con carga más baja.

- **Convertidor Full-Bridge**

Se considera un convertidor de energía totalmente controlado, trabaja tanto en AC/DC

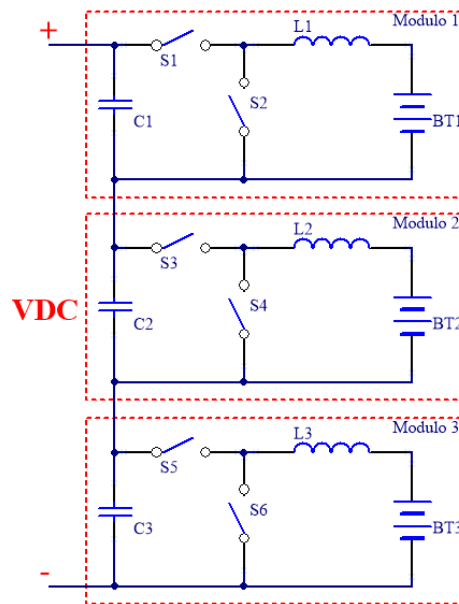


Figura 2.16: Balanceo activo utilizando un convertidor Buck.  
Fuente: [12]

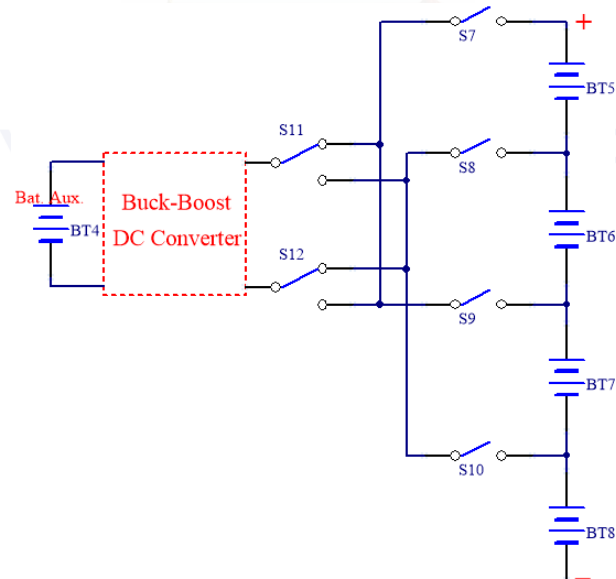


Figura 2.17: Balanceo activo utilizando un convertidor Buck-Boost.  
Fuente: [12]



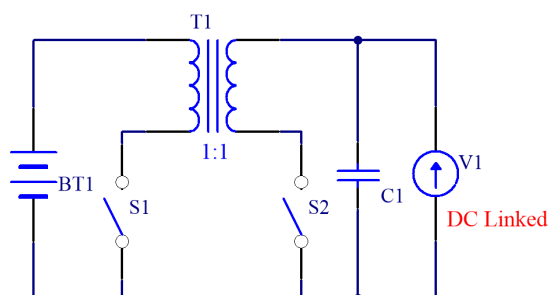


Figura 2.18: Balanceo activo utilizando un convertidor Flyback.

Fuente: [12]

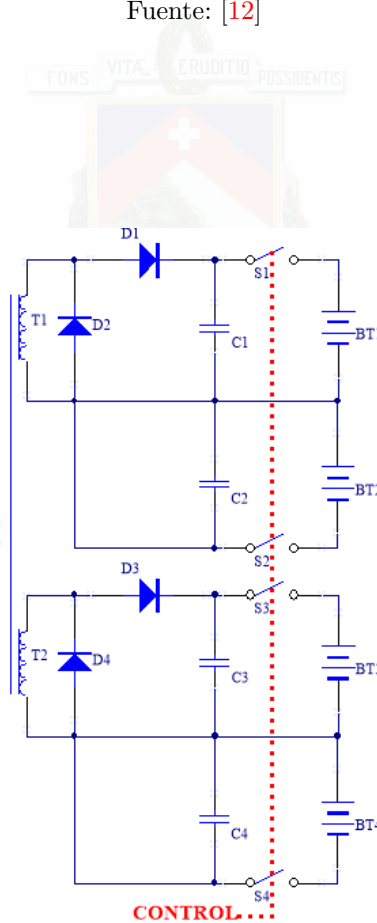


Figura 2.19: Balanceo activo utilizando un convertidor tipo rampa.

Fuente: [12]

como en [DC/DC](#), por lo cual es un método recomendado para vehículos eléctricos [\[12\]](#). La topología de conexión se indica en la Figura 2.20. Necesitan de un control complejo, además de que su implementación es costosa y compleja [\[12\]](#).

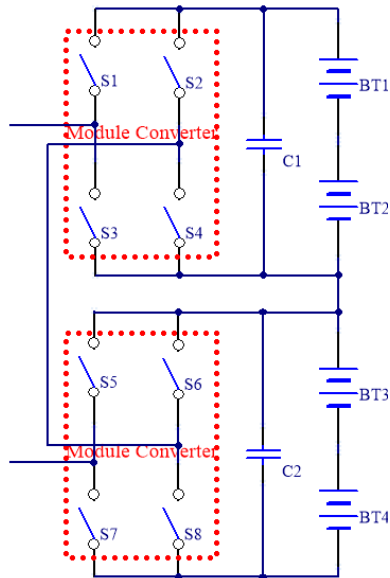


Figura 2.20: Balanceo activo utilizando un convertidor full-bridge.

Fuente: [\[12\]](#)

- **Convertidor Quasi-Resonante**

El convertidor Quasi-Resonante, indicado en la Figura 2.21, puede ser de 2 tipos: Zero-Current o Zero-Voltage. Utiliza un control avanzado para generar las señales PWM de conmutación, usa circuitos resonantes para la transferencia de energía. Este convertidor reduce las pérdidas por conmutación, incrementando la eficiencia del balanceo. La mayor desventaja que presenta este convertidor es el alto coste de implementación, así como la alta complejidad del control del mismo.

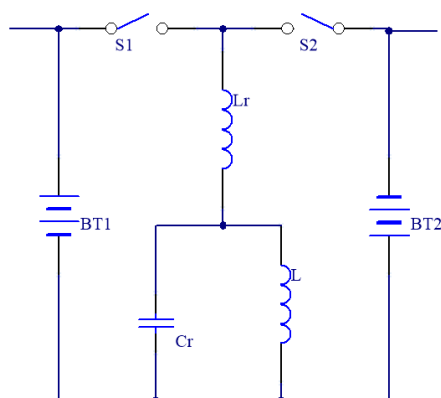


Figura 2.21: Balanceo activo utilizando un convertidor quasi-resonante.

Fuente: [12]

## 2.7. Sistema de gestión de baterías (Battery Management System)

Un sistema de gestión de baterías ó **BMS** (por sus siglas en inglés) monitoriza parámetros de funcionamiento de un banco de baterías, los cuales se relacionan mediante algoritmos y ejecutan acciones sobre el banco de baterías con la finalidad de que las condiciones de operación del mismo sean óptimas y evitar daños.

Entre los parámetros más comunes que monitoriza un **BMS** tenemos [10]:

- Toma de datos.
- Determinación del estado de carga del banco de baterías.
- Control de la carga y/o descarga del banco de baterías.
- Ecualización de las celdas.
- Gestión de la temperatura.
- Gestión de seguridad.
- Comunicación con la interfaz de usuario.

La decisión de monitorizar o no un parámetro es decisión del diseñador del sistema y de la aplicación en la que se esté utilizando el banco de baterías; por ende se puede encontrar sistemas de gestión que monitorizan uno o varios parámetros y sistemas que monitorizan todos los parámetros mencionados.

En el cuadro de la Figura 2.22, se observa la relación que existe entre los parámetros mencionados anteriormente, así como las variables que monitorizan cada parámetro. A continuación

se describe la función de cada uno de estos elementos de un [BMS](#).

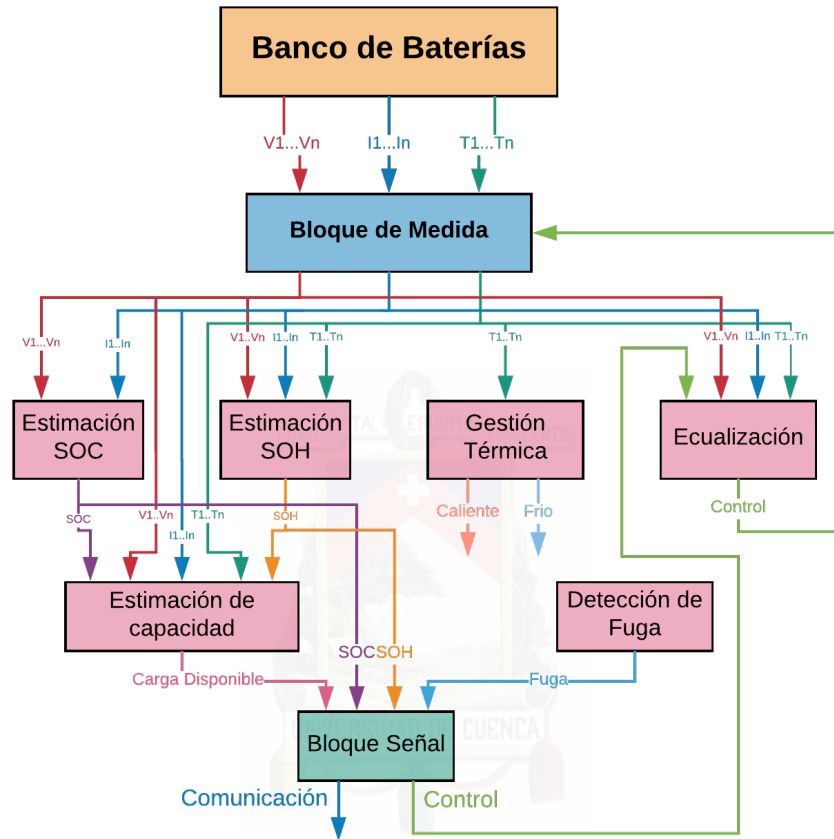


Figura 2.22: Funciones de un [BMS](#)

Fuente: Autores

### 2.7.1. Toma de medidas

Es el bloque encargado de recolectar los valores de: voltaje, corriente y temperatura, de cada celda o del banco de baterías. La frecuencia con la que se adquieren estos datos depende del uso del banco de baterías, por ejemplo, para un vehículo eléctrico se realiza en menos de un segundo, mientras que para un banco de baterías de un UPS puede ser mayor a 5 segundos [10].

La recolección de estos parámetros puede ser de 2 formas:

- **Centralizada:** Se denomina centralizada cuando se dispone de un dispositivo [BMS](#) que

cuenta con la unidad de toma de medidas dentro de él. No se requieren más componentes ya que el propio dispositivo realiza el procesamiento de las diferentes señales. Una desventaja a tener en cuenta es que se requiere de un mayor cableado entre el dispositivo BMS y el banco de baterías. En la Figura 2.23 se muestra la arquitectura antes descrita.

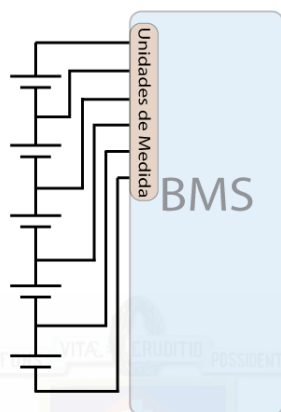


Figura 2.23: Toma de medidas con arquitectura centralizada

Fuente: Autores

- **Descentralizada:** Las unidades de medida son independientes del dispositivo BMS, se requiere una por cada celda. La forma de comunicación entre unidades de medida y el dispositivo BMS se lo realiza por protocolos de comunicación, por ejemplo CAN. En la Figura 2.24 se observa la arquitectura descrita anteriormente.

Una ventaja a destacar de esta arquitectura es la precisión en la toma de datos debido a

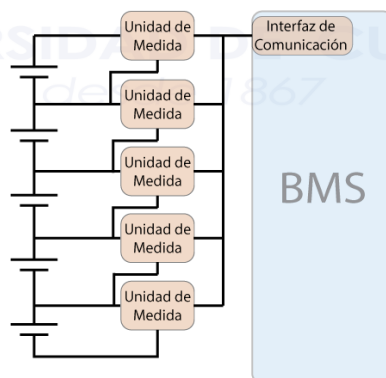


Figura 2.24: Toma de medidas con arquitectura descentralizada

Fuente: Autores

que utiliza dispositivos diseñados con este propósito.

En cuanto a la medición de voltajes, en esta arquitectura, presenta una dificultad, debido a que la mayoría de celdas se encuentran conectadas en serie en un banco de baterías, no



se tiene una referencia para cada de estas celdas, por lo que comúnmente tierras flotantes. Para medición de corrientes en un sistema [BMS](#) se lo realiza de 2 maneras:

- Utilizando resistencias de precisión (Recomendado para corrientes mayores a 10 A).
- Utilizando sensores de efecto hall.

### 2.7.2. Estimación del Estado de Carga (SoC)

El estado de carga es un parámetro importante requerido para la carga y descarga del banco de baterías. Como se menciona en el apartado [2.4](#), [SoC](#) se puede definir como la capacidad de una batería en función de su capacidad total, medida en porcentaje. De igual manera en [2.4](#) se menciona los métodos más comunes para estimar el [SoC](#) de una batería.

### 2.7.3. Estimación del Estado de salud (SoH)

La estimación del estado de salud de la batería o [SoH](#) (State of Health) hace referencia al punto que ha alcanzado dentro de su ciclo de vida con respecto al ciclo de vida de una batería nueva[10].

A diferencia del [SoC](#), [SoH](#) es una medida subjetiva, debido a que es una estimación realizada por el usuario, utilizando diferentes parámetros con respecto al rendimiento y tiempo de uso del banco de baterías.

Para determinar el [SoH](#) algunos fabricantes se basan en diferentes parámetros como:

- Resistencia y conductancia interna.
- Capacidad.
- Ciclos de carga y descarga.

### 2.7.4. Estimación de la capacidad

Este aspecto tiene la finalidad de deducir la capacidad nominal a partir de valores de (voltaje, corriente y temperatura), mediante algoritmos, en los que se encuentra trabajando el banco de baterías. Esta información es indispensable ya que el funcionamiento del banco de baterías está ligado a estos valores, si se encuentra en valores por encima de sus límites, su capacidad e integridad se verían afectados. Por lo general los valores de sus límites vienen especificados en la data técnica del fabricante de las celdas.

### 2.7.5. Gestión térmica

Un factor que influye al correcto funcionamiento del banco de baterías es la temperatura. Es necesario contar con un sistema de control térmico en aplicaciones que demandan potencias más altas. Uno de los mayores inconvenientes en estos sistemas es la forma de transferir el calor de las celdas fuera del banco de baterías, para esto se cuentan con elementos de refrigeración como se muestra en la Figura 2.25.



Figura 2.25: Sistemas de refrigeración para bancos de baterías

Fuente: [10]

En sistemas de altas potencias es necesario mantener el sistema de control separado del sistema de potencia, debido a que los primeros requieren un sistema de gestión térmica menor [10].

### 2.7.6. Balanceo ó Ecualización

Como se ha mencionado en el apartado 2.5, un buen balanceo de las celdas permite aprovechar al máximo las capacidades energéticas del banco de baterías.

Existen varios métodos de balanceo los cuales se encuentran descritos en 2.6.1 y 2.6.2.

### 2.7.7. Detección de fuga

Usualmente estos sistemas se encuentran en aplicaciones que demandan voltajes y corrientes altas, como es el caso de baterías de EV o de HEV en los cuales se manejan tensiones de 200 V a 400 V generalmente y corrientes de hasta 1000 A, en donde las fugas en el chasis se consideran un grave peligro.

Para la detección de fugas se utilizan sensores que miden el aislamiento que existe entre el banco de baterías y el chasis, si se detecta una baja impedancia o corriente excesiva, el banco de baterías es aislado mediante un conjunto de interruptores de seguridad.

Es necesario contar con un sistema de almacenamiento auxiliar para el funcionamiento de los interruptores de aislamiento, independiente del sistema a aislar [10].

### 2.7.8. Bloque de señal

Este bloque es el encargado de comunicar el BMS con las unidades de control externa como puede ser: PLC, microcontroladores, fpga. Para esto, se utilizan diferentes protocolos, entre los más usados se tiene:

- Bus CAN.
- Comunicación Serial.
- Comunicación  $I^2C$ .
- Comunicación SPI.
- DC-BUS.
- Protocolos Industriales (Profibus, Profinet, Modbus, etc).

## 2.8. Motores eléctricos, driver y controlador

El exoesqueleto está formado principalmente por 2 componentes: motores y drivers de control, los cuales deben ser alimentados por el banco de baterías. Por lo tanto, es necesario conocer un poco acerca de estos componentes, para así diseñar el sistema de alimentación. Un breve resumen se presente a continuación.

### 2.8.1. Motores del exoesqueleto

Para esta aplicación serán utilizados motores de la marca Maxon Motor, cuyo modelo son: EC 45 flat y EC 90 flat, los cuales son motores de corriente continua con un voltaje nominal de 24 V. [13] [14] El modelo EC 45 se usará para emular un tobillo y una rodilla, por otro lado, el modelo EC 90 emulará un costado de una cadera, siendo en total 3 motores por pierna.

La principal diferencia entre estos motores, como se aprecia en las figuras 2.26 y 2.27, es el tamaño y la potencia que pueden entregar, teniendo el modelo EC 90 un radio de 90 mm y una



potencia de 90 W y el modelo EC 45 un radio de 42.8 y potencia de 70 W [13] [14].

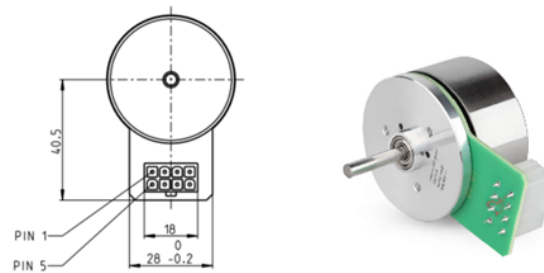


Figura 2.26: Motor EC 45, esquema a la izquierda, aspecto del motor a la derecha

Fuente: [14]

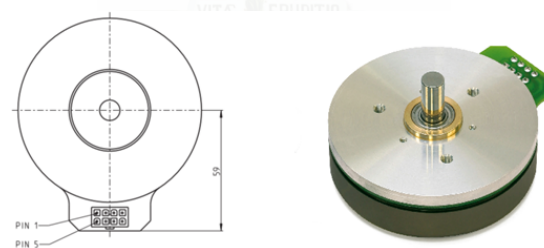


Figura 2.27: Motor EC 90, esquema a la izquierda, aspecto del motor a la derecha

Fuente: [13]

### 2.8.2. Driver controlador de motores

El Módulo EPOS4 50/8 es un módulo controlador dinámico inteligente de posicionamiento. Diseñado para usar con motores DC con codificadores y motores EC sin escobillas con sensores Hall y codificadores de hasta 400 W de potencia de salida continua [15].

Los dispositivos están especialmente diseñados para ser ordenados y controlados como un nodo esclavo en una red CANopen. Además, las unidades pueden operarse a través de cualquier puerto de comunicación USB o RS232 de los sistemas operativos Windows o Linux [15].

Este módulo es el encargado de controlar los motores del exoesqueleto, funcionando con un voltaje de entre 10 a 50 V, con una corriente de entre 3 a 10 A. En la Figura 2.28 se presenta este driver.

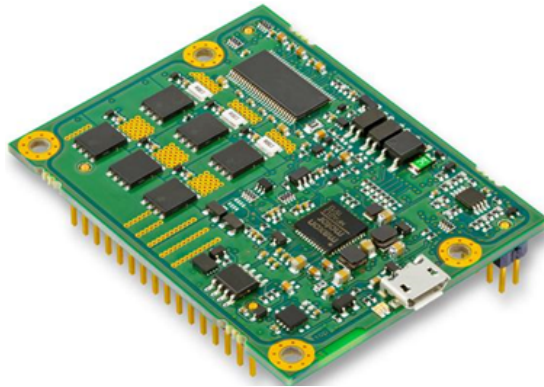


Figura 2.28: Driver EPOS4 Module 50/8

Fuente: [15]

## 2.9. Comunicación entre dispositivos

Los sistemas de comunicación entre los subsistemas forman parte del conjunto de elementos prioritarios en el exoesqueleto, existen múltiples protocolos de comunicación, sin embargo, la comunicación serial permiten transmitir información mediante un reducido medio físico con protocolos confiables. Uno de ellos, la interfaz serie a periférico (**SPI**, del inglés Serial to Peripheral) fue una de las tantas tecnologías desarrolladas para reemplazar las interfaces paralelas. Recibió el nombre de **SPI** por parte de Motorola en el año de 1970 en su primera MCU (microcontroller unit) basada en su microcontrolador 68000, esta se conectaba con diversos periféricos usando la interfaz **SPI**. Debido a la simplicidad y velocidad, esta interfaz se convirtió en un protocolo de comunicación popular [16].

En esta interfaz se identifican dos tipos de dispositivos: maestro y esclavo. Un dispositivo maestro es aquel que genera la señal de reloj e inicia la comunicación. Un esclavo es cualquier dispositivo controlado por el maestro. La activación de un esclavo se lleva a cabo a través de la línea selectora denominada Chip Select (**CS**) o Select Slave (**SS**). Por lo general se tiene una línea de selección por cada esclavo [16].

Solo puede existir un dispositivo maestro a la vez en el mismo bus. Si un dispositivo esclavo no está en uso, debe deshabilitarse (ponerlo en alta impedancia) usando la línea **CS**.

**SPI** implementa una comunicación usando 4 líneas (cables), cada una transmite información en una sola dirección. De estas líneas, dos se emplean para la transmisión y recepción de datos, una para la selección del dispositivo esclavo y la cuarta es usada para entregar la señal de reloj [16]. En un dispositivo maestro estas líneas son:

- **MOSI** (Master Out Slave In), esta línea es la encargada de transportar los datos desde el maestro hacia el esclavo.
- **MISO** (Master In Slave Out) transporta los datos desde el dispositivo esclavo hacia el maestro.
- Chip Select (**CS**) o Select Slave (**SS**), permite la activación de un dispositivo esclavo, colocando un nivel lógico 0.
- Señal de reloj serial (**SCLK**, del inglés Serial Clock) es generada por el dispositivo maestro y sirve para sincronizar la transferencia de datos.

En un dispositivo esclavo usualmente las líneas reciben los siguientes nombres:

- **SDI** (Serial Digital In), esta línea permite la recepción de datos.
- **SDO** (Serial Digital Out), línea por donde se envían los datos.
- Chip Select (**CS**) o Select Slave (**SS**), permite la activación de un dispositivo esclavo, colocando un nivel lógico 0.
- Señal de reloj serial de entrada (**SCKI**, del inglés Serial Clock In), línea por donde se recibe la señal de reloj.

La Figura 2.29 presenta la conexión entre un dispositivo maestro y dos esclavos usando la comunicación **SPI**. Aquí se observa que el maestro tiene las dos líneas de comunicación de datos y la línea del reloj compartida para los dos dispositivos, no así la línea **SS**, de la cual existe una para cada esclavo [16].

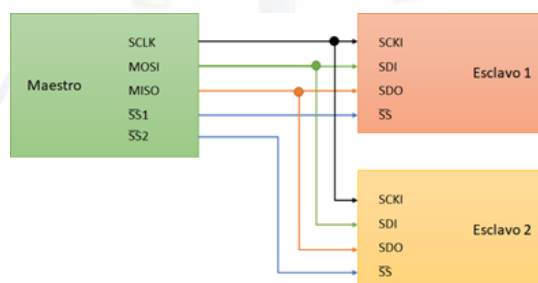


Figura 2.29: Conexión **SPI** entre dispositivos Maestro-Eslavos

Fuente: Autores

Cada esclavo es activado colocando un 0 lógico en la línea **SS** correspondiente. Los datos por el bus pueden alcanzar una velocidad de hasta 1 Mbps. Cada dato es transferido en bloques de 8 bits, cada bit se transmite en un ciclo de reloj, siendo el bit más significativo (**MSB**, most significant bit) el que se transmite primero.

La configuración de la interfaz **SPI** se realiza a través de dos bits de configuración: **CPOL** (Clock Polarity) y **CPHA** (Clock Phase). El bit **CPOL** determina el estado idle del reloj, si **CPOL**=0 el

reloj se mantiene en bajo, si  $CPOL=1$  el reloj se mantiene en alto. Por otro lado, el bit  $CPHA$  determina el flanco del reloj en el que los bits serán desplazados desde el transmisor hacia el bus de datos y el flanco en el que estos serán leídos por parte del receptor [16].

Dados los dos posibles estados de los bits de configuración (0 o 1), se obtienen 4 modos posibles de configurar una interfaz  $SPI$ , siendo estos modos denominados: Modo 0, Modo 1, Modo 2 y Modo 3. Estos modos son incompatibles entre sí, por lo que en una comunicación un dispositivo maestro y sus esclavos deben tener la misma Polaridad de reloj ( $CPOL$ ) y la misma Fase de reloj ( $CPHA$ ). El modo es determinado por el dispositivo esclavo. Los diferentes modos son descritos a continuación.

- Modo 0 ( $CPOL = 0$  y  $CPHA = 0$ ): Estado idle del reloj en bajo. El primer bit es colocado en el bus tan pronto como  $CS$  se coloca en 0 y es leído en el primer flanco de reloj. Cada nuevo bit se coloca en el bus en un flanco de bajada y es leído en el siguiente flanco de subida.
- Modo 1 ( $CPOL = 0$  y  $CPHA = 1$ ): Estado idle del reloj en bajo. Cada bit se coloca en el bus en un flanco de subida y se lee cuando el reloj tiene un flanco de bajada.
- Modo 2 ( $CPOL = 1$  y  $CPHA = 0$ ): Estado idle del reloj en alto. El primer bit es colocado en el bus tan pronto como  $CS$  se coloca en 0 y es leído en el primer flanco de reloj. Cada nuevo bit se coloca en el bus en un flanco de subida y es leído en el siguiente flanco de bajada.
- Modo 3 ( $CPOL = 1$  y  $CPHA = 1$ ): Estado idle del reloj en alto. Cada bit se coloca en el bus en un flanco de bajada y se lee cuando el reloj tiene un flanco de subida.

Para entender de una mejor manera, en las figuras 2.30, 2.31, 2.32 y 2.33 se presentan los 4 modos de comunicación que posee  $SPI$ . En todos los casos, los datos se leen a la mitad del ciclo de reloj después de que se ponen en la línea de datos [16].

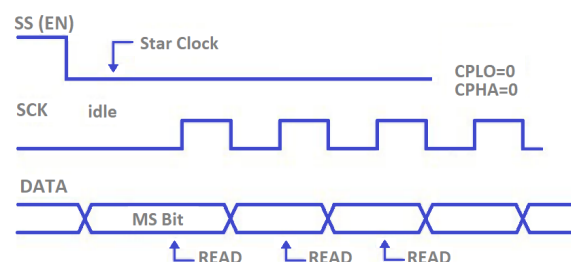


Figura 2.30: Modo 0 de la comunicación  $SPI$

Fuente: [16]

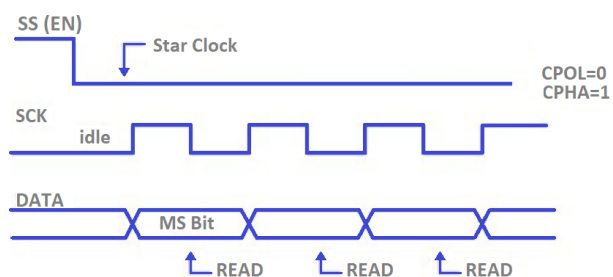


Figura 2.31: Modo 1 de la comunicación SPI  
Fuente: [16]

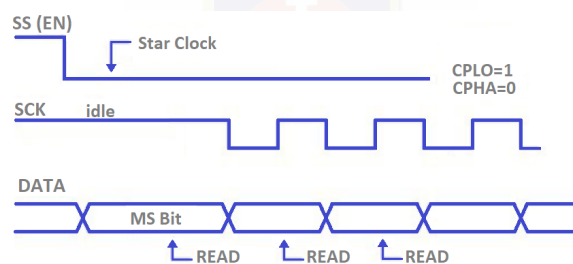


Figura 2.32: Modo 2 de la comunicación SPI  
Fuente: [16]

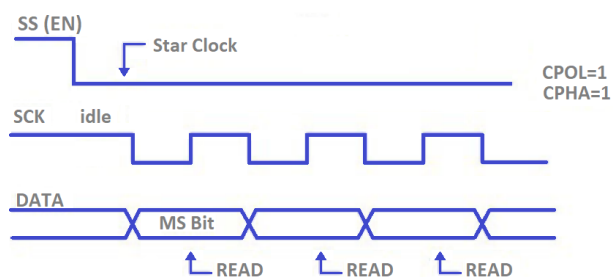


Figura 2.33: Modo 3 de la comunicación SPI  
Fuente: [16]



## Capítulo 3

# Elección y estimación energética de los componentes

En este capítulo se presenta el proceso de selección de los diferentes componentes para el diseño del sistema de gestión de energía. Para ello, se inicia con un análisis del consumo energético de los equipos dependientes del sistema, determinado de esta forma los voltajes y corrientes necesarios de los mismos. Además, se investiga y selecciona el circuito integrado a cargo del monitoreo de las celdas y el microcontrolador necesario para comandar este dispositivo.

### 3.1. Consumo Energético de los drivers y motores

#### 3.1.1. Consumo Energético de los motores

La alimentación de los motores a utilizar se realiza mediante el driver EPOS4 Module 50/8, el cual según [15] tiene los siguientes requerimientos energéticos:

- Voltaje de alimentación entre 10 y 50 V DC.
- Corriente de consumo de entre 1 y 3 A, dependiendo de la carga.
- Pines de alimentación para sensores de corriente y sistema de seguridad.

Tomando en cuenta que el voltaje mínimo de los motores es de 24 V [13], se tiene con una corriente de 3 A, un consumo de energía de 72 Watts por motor. Al ser 6 motores el total del consumo energético es de 432 Watts. En la Tabla 3.1 se resume el consumo energético de los motores comandados por los drivers.

Tabla 3.1: Consumo energético de los motores

Motores Activos	Energía (W)
1	72
6	432
Fuente: [13], [14]	

#### 3.1.2. Consumo de pines de control del driver

El driver EPOS4 Module 50/8, posee una serie de pines de control y sensores que deben ser alimentados para el correcto funcionamiento del motor asociado. Según [15] los requerimientos para cada pin se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Consumo energético de los drivers

Pin	Voltaje de alimentación (V)	Corriente de consumo (mA)	Energía Consumida (1 motor) (W)	Energía Consumida (6 motores) (W)
STO	5	150	0,75	4,5
Hall Sensor	5	30	0,15	0,9
Seguridad	3,3	100	0,33	1,98

Fuente: [15]

### 3.2. Consumo etapa de procesamiento de control

En la aplicación del proyecto se ha utilizado un sistema embebido modelo Raspberry, que requiere una alimentación de 5 V, consumiendo 2.5 A a máxima potencia [17]. Esta energía es necesaria para poder activar y/o alimentar los componentes externos conectados al equipo, como: pantalla LCD, sensores, periféricos de entrada y salida, etc. El consumo de este dispositivo es de 12.5 W.

### 3.3. Consumo de electrónica de control

En el sistema de control, compuesto por un conjunto de circuitos dedicados a medición y otras actividades, contempla un microcontrolador Arduino y el circuito integrado dedicado al BMS.

En el caso del microcontrolador Arduino, según [18] al ser alimentado con 5 V consume 200 mA de corriente, dando un total de 1 W. En cuanto al integrado que cumple las funciones de BMS, éste se alimenta directamente de las baterías, con un consumo máximo de 1.2 mA.

### 3.4. Convertidores DC-DC

En vista de que se tendrá un banco de baterías que entregue como mínimo 24 V (voltaje mínimo de alimentación de los motores) es necesario implementar convertidores DC-DC que disminuyan este voltaje a un valor adecuado para ser usado por los diversos controladores, sensores, etc., de los motores y demás componentes del exoesqueleto.

Para obtener los voltajes requeridos en la sección 3.1 se buscaron convertidores DC-DC que a su entrada admitan el rango de voltaje entregado por el banco de baterías y a su salida se obtenga un voltaje continuo específico para cada componente. Estos convertidores se detallan a continuación.

#### 3.4.1. Convertidor DC-DC VX780X-1000

Para la alimentación de energía eléctrica a partir de un banco de baterías a los distintos componentes electrónicos, es utilizado un conjunto de convertidores DC-DC reductores que permiten adecuar la tensión de alimentación según el voltaje de salida necesaria. En el diseño es utilizado en circuito VX780X-1000 de la marca CUI Inc., el cual es un regulador DC no aislado operable



desde  $-40^{\circ}\text{C}$  @  $+68^{\circ}\text{C}$  de temperatura.[19] El modelo VX7805-1000 otorga 5 V y 1 A a su salida con un rango de voltaje de entrada de 8 a 36 V, con una eficiencia del 93 %. El modelo VX7803-1000 opera en el rango de 6 a 36 V otorgando 3.3 V y 1 A a su salida con una eficiencia de 90 %. En la Figura 3.1 se presenta el convertidor VX780X-1000, este posee 3 pines, los cuales son: voltaje de entrada, GND y voltaje de salida respectivamente.[19]



Figura 3.1: Conversor VX780X-1000

Fuente: [19]

El convertidor VX7805-100 es utilizado para energizar el sistema de control y sensores de los motores. Se plantea usar 2 por pierna, otorgando 2 A de corriente. Adicionalmente se instalarán otros 2 convertidores en la placa principal para usarse como alimentación para futuros componentes. El convertidor VX7803-100 es necesario para la electrónica de seguridad de los motores.

### 3.4.2. Convertidor DC-DC XL4015 DC-DC de 75 W

Este convertidor es capaz de recibir a su entrada un voltaje de entre 4 a 38 V, dando como resultado un voltaje, seleccionable, de entre 1.25 a 36 V, entregando una corriente máxima de 5 A, con una eficiencia del 96 % en un rango de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  @  $+125^{\circ}\text{C}$ . [20]. En la Figura 3.2 se presenta este componente.

En este circuito es necesario ajustar su potenciómetro para obtener la salida deseada, teniendo en cuenta que el voltaje de entrada debe ser al menos 1.5 V mayor al voltaje de salida. En este caso al usarse para alimentar un el Raspberry con 5 V, el rango de voltaje entregado por las baterías es adecuado (entre 24 y 29.6 V). Este convertidor se emplea para la alimentación del Raspberry o de cualquier otro dispositivo con entrada USB.

La Tabla 3.3 resume los convertidores DC-DC con sus principales características.

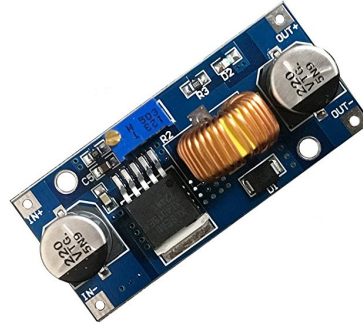


Figura 3.2: Módulo XL4015 DC-DC 75 W  
Fuente: [20]

Tabla 3.3: Características de los conversores DC-DC

Conversor	Voltaje de entrada (V)	Temperatura de operación (° C)	Voltaje de salida (V)	Corriente máxima de salida (A)	Implementación
VX7805-1000	8 a 36	-40 @ +68	5	1	Se utilizará para alimentar los controladores y sensores de los motores, así como para usarse en futuros componentes.
VX7803-1000	6 a 36	-40 @ +68	3.3	1	Alimentación del sistema de seguridad de los motores y futuros componentes.
XL4015	4 a 36	-40 @ +125	5	2.5	Alimentación del Raspberry (sistema central del exoesqueleto)

Fuente: [19], [20]

### 3.5. Circuito integrado de Gestión de Baterías

El circuito integrado (CI) de gestión de baterías o BMS es, conjunto con un microcontrolador, la pieza clave en este proyecto, pues como se explicó en el apartado 2.4 y 2.5, es crucial el monitoreo constante de los parámetros de las baterías como: voltaje por celda, voltaje total, temperatura, etc., así como la correcta ecualización de las celdas que conforman la batería.

La selección de un circuito integrado BMS se llevó a cabo analizando una serie de modelos y marcas disponibles en el mercado, comparando su precio, disponibilidad, interfaz de comunicación, tipo de balanceo de carga y modo de programación. A continuación, se presentan los BMS analizados, siendo el último el que se optó por implementar.

#### 3.5.1. Circuito Integrado Bq769x0

El CI bq769x0 de la marca Texas Instruments, que pertenece a 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-Ion and Phosphate Applications, es capaz de manejar entre 3 a 15 baterías en serie del tipo ion de litio, fosfato de hierro de litio, etc. Cuenta con ADC, posibilidad de medir temperatura través de termistores externos y balanceo externo e interno de celdas.

La serie bq769x0 consta de 3 versiones, estas son:

1. bq76920 admite hasta 5 celdas en serie o un voltaje típico de 18 V,
2. bq76930 maneja hasta 10 celdas en serie o un voltaje típico de 36 V, y
3. bq76940 funciona con hasta 15 celdas en serie o un voltaje típico de 48 V.

Las desventajas que presenta este dispositivo son: máximo de 5 mA de corriente de balanceo (para los modelos bq76930 y bq76940), ver Figura 3.3. El CI debe ser programado de forma externa a través de comunicación I2C con un microcontrolador específico de la marca Texas (MSP430G2553), el cual, si bien no es costoso, en la actualidad se encuentra obsoleto y casi inexistente, además de que se debería adquirir su tarjeta programadora, la cual ronda los \$150 dólares. [21]

#### 3.5.2. Circuito Integrado ISL94202

Circuito integrado de la marca Intersil, da la posibilidad de hacer un balance externo de 3 a 8 baterías de litio serie sin la necesidad de un microcontrolador externo, sin embargo debe ser programado previamente a través de una interfaz I2C. Posee interfaz de comunicación I2C y un

### 6.1 Absolute Maximum Ratings

			MIN	MAX	UNIT
$V_{BAT}$	Supply voltage	(BAT-VSS)	-0.3	36	V
		(BAT-VC5x), (VC5x-VSS)			
		(BAT-VC10x), (VC10x-VC5x), (VC5x-VSS)			
$V_I$	Input voltage	(VCn-VSS) where n = 1..5	-0.3	(n × 7.2)	V
		(VCn-VSS) where n = 1..5, (VCn-VC5x) where n = 6..10			
		(VCn-VSS) where n = 1..5, (VCn-VC5x) where n = 6..10, (VCn-VC10x) where n = 11..15			
		REGSRC			
$V_O$	Output voltage	REGOUT, ALERT	-0.3	3.6	V
		DSG	-0.3	20	
		CHG	-0.3	$V_{CHGCLAMP}$	
$I_{CB}$	Cell balancing current (per cell)	bq76920	70		mA
		bq76930, bq76940	5		mA
$I_{DSG}$	Discharge pin input current when disabled (measured into terminal)		7		mA
$T_{STG}$	Storage temperature		-65	150	°C
	Lead temperature (soldering, 10 s)			300	

Figura 3.3: Valores absolutos máximos del CI bq769x0

Fuente: [21]

ADC incorporado.

Las desventajas, al igual que el CI anterior, radican en la necesidad de un microcontrolador y una placa de comunicación específicos, la ISL94202EVKIT1Z, indicados en la Figura 3.4, sumando un total de \$160 dólares, además del hecho de que este conjunto se encuentra discontinuado. [22]

Adicionalmente, el propio fabricante indica que este tipo de CI no es recomendable para personas con poca experiencia en el tema, debido a la complejidad de su programación al momento de tomar en cuenta gran variedad de puntos para el algoritmo de balanceo de carga y monitoreo de voltaje.

### 3.5.3. Circuito Integrado LTC6801

Este integrado, de la marca Linear Technology, permite monitorear hasta 12 celdas de ion de litio con un máximo de 60 V. Incorpora un ADC de 12 bits que se emplea para medir el voltaje de cada celda de forma individual además de permitir la lectura de temperatura a través de 2 termistores externos, todo esto sin la necesidad de un microcontrolador externo.

La desventaja principal de este CI se encuentra al momento de realizar el balanceo de carga,

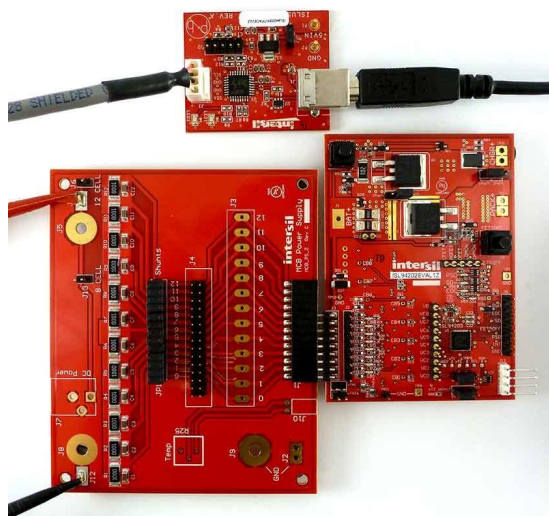


Figura 3.4: Kit ISL94202EVKIT1Z

Fuente: [22]

ya que para lograr esta función, debe ser conectado en serie con el CI LTC6802-1, en pocas palabras, por sí mismo es incapaz de realizar un balance de carga. [23]

#### 3.5.4. Circuito Integrado LTC6802-1

Este circuito integrado está diseñado para la gestión de hasta 12 baterías de ion de litio con un máximo de 60 V total. El LTC6802-1 permite la medición de voltajes individuales en un tiempo máximo de 13 ms, medición de temperatura a través de dos termistores externos, comunicación SPI con un microcontrolador externo y balanceo externo de baterías. Es posible conectar en serie varios de estos dispositivos con el fin de manejar una gran cantidad de baterías. La desventaja es que este CI es obsoleto, existiendo una versión mejorada del mismo. [24]

#### 3.5.5. Circuito Integrado LTC6802-2

El LTC6802-2, presentado en la Figura 3.5, es un circuito integrado de gestión de baterías. Este es el CI seleccionado para trabajar con las baterías, consta de 44 pines, de los cuales 24 (del pin 2 al 25) están destinados a la medición de voltaje y balanceo de carga. Es una versión mejorada del LTC6802-1 con la opción de un manejo mucho más fácil de CIs en serie a través de los pines A0-A3. La principal ventaja se encuentra en su fácil programación, la misma que se realiza a través de comunicación SPI mediante comando simples para las acciones de monitoreo, medición y balanceo de carga. [4]

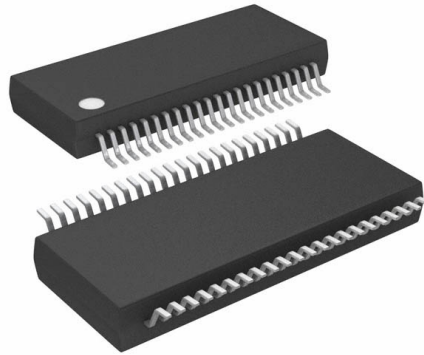


Figura 3.5: CI LTC6802-2

Fuente: [4]

Este circuito integrado cuenta con tres modos de funcionamiento: standby, monitoreo y medición. El modo standby, o modo de menor consumo, desactiva todas las funciones excepto la comunicación SPI y el regulador de voltaje de alimentación, este modo puede ser desactivado mediante comandos a través del microcontrolador externo. El modo monitoreo permite al CI funcionar sin la necesidad de un microcontrolador externo, realizando la medición de las baterías y temperatura. Por último, se tiene el modo medición, el cual realiza la medición de los voltajes y temperaturas, balanceo de las celdas, configuración de voltajes máximos y mínimos, etc., esto se lleva a cabo a través de comandos enviados por un microcontrolador externo.

El voltaje mínimo que debe ser administrado por el conjunto de baterías en serie para que el integrado funcione es de 10 V y el voltaje máximo, al igual que su predecesor, es de 60 V. Consume una corriente mínima de 50  $\mu\text{A}$ , en el modo standby, y una corriente máxima de 1.2 mA en el modo medición.

El balanceo de las baterías se realiza de forma individual para cada celda de manera externa a través de un circuito conformado por un MOSFET, un diodo Zener y un par de resistencias; la potencia disipada está limitada por estos componentes.

Para la medición de temperatura se emplea un circuito externo que consta de dos resistencias de 10  $k\Omega$ , dos condensadores de 1  $\mu\text{F}$  y dos termistores ntc de 10  $k\Omega$ .

El microcontrolador externo se comunica con este CI a través de la interfaz SPI. Todas las acciones que el CI debe realizar son indicadas previamente por el microcontrolador a través del envío de comandos hexadecimales. Estos comandos indican: el modo de funcionamiento, activación o desactivación del balanceo de carga, lectura de los voltajes de las celdas, etc.

## 3.6. Sensores

### 3.6.1. Termistor NTC NTCLE413

El termistor NTCLE413 de la marca VISHAY, Figura 3.6, es una resistencia que varía con la temperatura, posee un coeficiente de temperatura negativo (NTC, del inglés Negative Temperature Coefficient) lo que significa que a mayor temperatura este tendrá una menor resistencia. Este sensor consiste en un pequeño chip NTC soldado a dos cables AWG 30, resistente hasta 105 ° C. Se encuentra lacado y aislado con un recubrimiento de epoxi negro. [25]



Figura 3.6: Termistor NTCLE413

Fuente: [25]

### 3.6.2. Sensor de Corriente ACS712

El circuito integrado ACS712T, de la marca Allegor, es un dispositivo que consta de un circuito de sensor Hall lineal de hasta 30 A, preciso y de baja desviación, con una trayectoria de conducción de cobre ubicada cerca de la superficie de la matriz. La corriente aplicada que fluye a través de este camino de conducción de cobre genera un campo magnético que es detectado por el Hall IC integrado y se convierte en un voltaje proporcional [26] .

En la Figura 3.7 se presenta el PCB del sensor ACS712T, consta de 2 pines digitales (VCC, GND), un pin analógico (Salida del voltaje proporcional a la corriente) y los correspondientes pines de medición de corriente.

Para un correcto funcionamiento del sensor es necesario una calibración previa[26], permitiendo determinar la ecuación con la cual en base al valor de voltaje entregado se determina la corriente que pasa por el sensor.

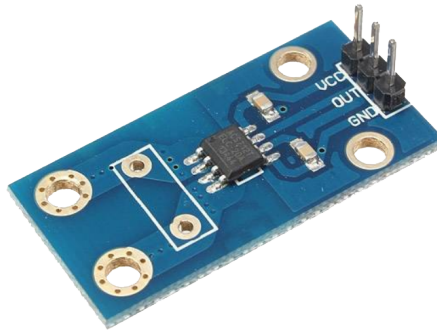


Figura 3.7: Termistor NTCLE413  
Fuente: [26]

### 3.7. Microcontrolador

Como se mencionó en el segmento anterior, el integrado LTC6802-2 necesita de un microcontrolador externo que envíe comandos de configuración para los parámetros de:

- Medición de voltajes de celdas (encendido de los DAC),
- Activación/desactivación del balanceo de carga,
- Designación de voltajes mínimos y máximos de las celdas,
- Medición de temperatura,
- Lectura y escritura de registros.

El integrado LTC6802-2 es compatible únicamente con el modo 3 de la interfaz [SPI](#), es decir, con los bits [CPHA](#)=1 y [CPOL](#)=1. Cada dato a transmitirse consiste de un registro de 8 bits. Estos registros son transmitidos con el bit más significativo ([MSB](#)) en primer lugar.

El microcontrolador debe, además, transmitir los datos de voltaje de celdas y temperaturas medidas al microcontrolador principal, es decir, el sistema central del exoesqueleto, por lo que debe contar con una interfaz extra para desarrollar dicha comunicación.

En vista a los puntos mencionados, se optó por escoger un microcontrolador Arduino Nano, ya que este posee dos interfaces seriales: [SPI](#) y [RS232](#). Siendo la interfaz [SPI](#) la encargada de realizar la comunicación y control con el integrado LTC6802-2, para luego transmitir los datos mediante [RS232](#) al sistema central del exoesqueleto. El reducido tamaño, fácil programación (mediante el uso de librerías), implementación sencilla de las interfaces [SPI](#) y [RS232](#), consumo de 5 V y 200 mA, reducido coste en comparación con otros microcontroladores y al no requerirse una gran demanda de cómputo (pues simplemente se trata de envío de comandos y datos) hacen a este microcontrolador el ideal para llevar a cabo la tarea de control del integrado LTC6802-2.



En la Figura 3.8 se presenta este microcontrolador. [18]

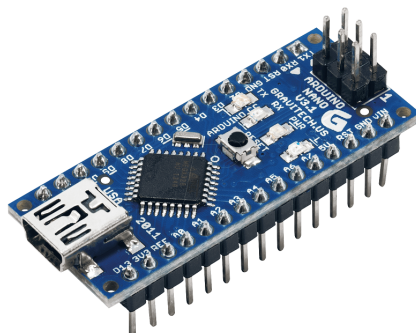


Figura 3.8: Arduino Nano

Fuente: [18]

La Figura 3.9 presenta el diagrama de conexión del integrado LTC6802-2 y un microcontrolador Arduino. Este esquema, recomendado por la data técnica, implementa la lectura de 12 celdas y realiza un balanceo interno a través de las resistencias conectadas a los pines  $S_{ij}$ . Las dos resistencias de  $10\text{ k}\Omega$  se implementan para mantener estables los datos transmitidos durante los ciclos de reloj.

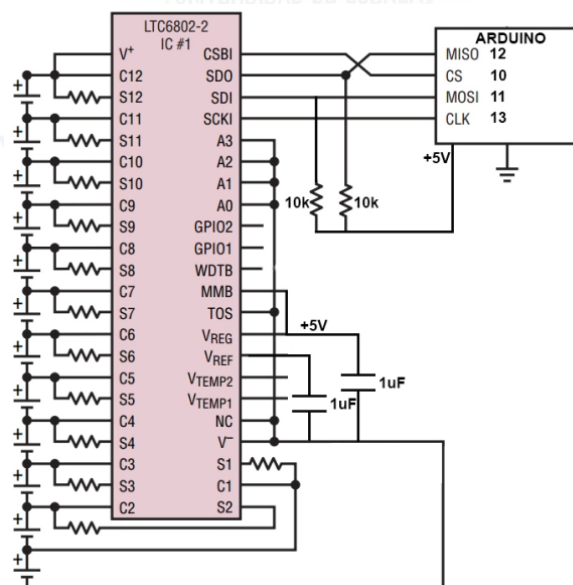


Figura 3.9: Conexión entre LTC6802-2 y un microcontrolador Arduino

Fuente: [4]

### 3.8. Comunicación hacia el sistema Central

El sistema central del exoesqueleto está formado por un Raspberry Pi 3 modelo B, el cual es un computador embebido que funciona con una gran gama de sistemas operativos, entre los cuales cabe destacar: Ubuntu y Raspbian (versión de Debian para Raspberry). Según las indicaciones de fábrica tiene un consumo de 5 V y 2.5 A máximo. Cuenta con 4 puertos USB compatibles con el protocolo serial [RS232](#), salida HDMI, puertos digitales de entrada y salida, puerto para cámara, capacidad para conectar pantallas táctiles, entre otros. [\[27\]](#) En la Figura [3.10](#), se presenta el computador Raspberry Pi 3 modelo B.

Este dispositivo está encargado de:

- Controlar los motores.
- Adquirir y almacenar datos de los motores, consumo energético,
- Mostrar la interfaz principal del exoesqueleto mediante una pantalla LCD.

Todas estas funciones se llevan a cabo a través de la programación de diferentes scripts.



Figura 3.10: Raspberry Pi 3 modelo B  
Fuente: [\[27\]](#)

## 3.9. Cables y conectores

### 3.9.1. Conectores para el banco de baterías

Para la conexión entre celdas se utiliza tornillos de diámetro 3/16 de pulgada y una longitud de 1/2 de pulgada, así como arandelas de 14 mm y 24 mm de diámetro, estos se muestran en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Conectores para el banco de baterías. De izquierda a derecha: arandela de 24 mm, arandela de 14 mm, tornillo de 3/16 de pulgada y tuerca.

Fuente: Autores

### 3.9.2. Conectores para el monitoreo de celdas

Para la conexión de las celdas se utiliza cable AWG 22 así como conectores tipo arandela para cable AWG 22. Como conector entre el banco de baterías y el circuito electrónico para el monitoreo de las celdas se utiliza un conector de 10 pines de 4.2 mm indicado en la Figura 3.12.

### 3.9.3. Conectores para la alimentación de los drivers y electrónica

Se utiliza cable AWG 8 flexible para la alimentación del banco de baterías hacia la electrónica de potencia que servirá como alimentación de los drivers y la electrónica asociada, este tipo de cable soporta corrientes de hasta 40 A. De manera similar al punto anterior se utiliza conectores tipo arandela para cable AWG 8 tanto para la salida del banco de baterías como para la conexión al circuito electrónico. El cable y los conectores se indican en las figuras 3.13(a) y 3.13(b).

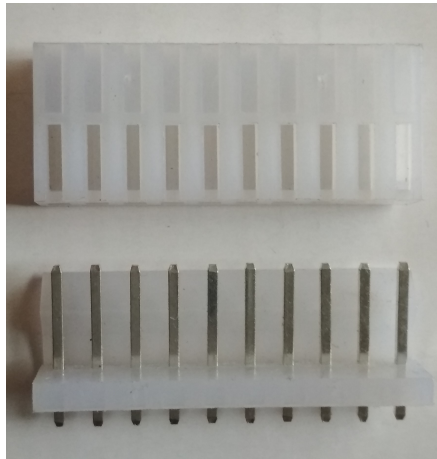


Figura 3.12: Conector de 10 pines de 4.2 mm. Arriba: conector hembra. Abajo: conector macho  
Fuente: Autores



(a) Cable AWG 8

(b) Conector tipo arandela para cable AWG 8

Figura 3.13: Conectores para la alimentación  
Fuente: Autores

#### 3.9.4. Conector para la carga

Se utiliza un conector automotriz de 9 pines para la conexión entre el cargador y el banco de baterías. Este conector se muestra en la Figura 3.14.

La distribución de pines del conector es la siguiente:

- 4 pines para la conexión de  $V+$ .
- 4 pines para la conexión de  $V-$ .
- 1 pin para el censado del estado del cargador.

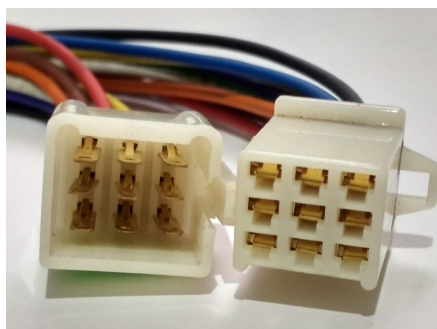


Figura 3.14: Conector automotriz de 9 pines  
Fuente: Autores

### 3.10. Autonomía del Sistema

La autonomía indica la cantidad de tiempo que un sistema funcionará de forma continua. En nuestro caso esta autonomía se basa en la cantidad de tiempo que duraría una terapia con el exoesqueleto. Según [28] la duración de una terapia motriz debe ser a lo mucho de 45 minutos, para que el paciente no sufra lesiones y se acostumbre a la terapia. Teniendo en cuenta este valor, se plantea que el sistema energético tenga una autonomía de al menos el doble de este tiempo, es decir 90 minutos, ya que el sistema debe estar disponible para realizar al menos 2 sesiones antes de realizar una carga del banco de baterías.

#### 3.10.1. Consumo total de Energía

Para determinar la autonomía del sistema es necesario conocer de forma muy aproximada el consumo total de energía del sistema. La Tabla 3.4 resume los voltajes y corrientes consumidos por los componentes del exoesqueleto.

Se tiene entonces un consumo de 24,032 Ah. Sin embargo, este valor se obtuvo suponiendo que los motores trabajarán al 100 % de su capacidad en todo momento, lo cual no representa la realidad.

#### 3.10.2. Consumo real de energía

El mayor consumo de energía se da por los motores (drivers) ya que estos son los encargados de ayudar al usuario a mover sus extremidades inferiores y por lo tanto necesitan de una gran potencia. Por lo tanto es necesario determinar un consumo real de los motores mediante un análisis que determine cuáles y en qué momentos los motores están activos.

Tabla 3.4: Consumo energético de los drivers

Componente	Cantidad	Voltaje (V)	Corriente Máxima (A)	Energía de Consumo (W)
Motores y Drivers	6	24	18	432
STO driver	6	5	0,9	4,5
Hall sensor driver	6	5	1,8	9
Seguridad driver	6	3,3	0,6	1,98
Raspberry	1	5	2,5	12,5
Microcontrolador	1	5	0,2	1
LTC6802-2	1	10	0,012	0,12
Sensor ACS712	2	5	0,01	0,1
TOTAL			24,032	461,2

Fuente: [13], [14], [15]

En [29] se explica el andar de una persona partiendo del reposo, un resumen se muestra en la Figura 3.15, a continuación se explica cada paso.

- En primer lugar se tiene a la persona detenida, en donde ningún motor está en movimiento.
- Al comenzar el movimiento de la pierna izquierda, el talón mueve el pie un poco hacia abajo, la rodilla se flexiona y envía el pie hacia atrás y la cadera alza la pierna. La pierna derecha permanece inmóvil.
- La rodilla izquierda se flexiona y envía el pie hacia adelante, la cadera y rodilla derecha permanecen alineadas con el cuerpo, mientras que el tobillo derecho actúa como punto de pivote enviando el cuerpo hacia adelante.
- El talón izquierdo actúa como pivote, alistando el punto de balanceo para el movimiento de la pierna derecha, la rodilla y cadera izquierda empiezan a regresar a su punto de partida.
- La rodilla derecha se flexiona enviando el pie hacia atrás, la cadera derecha impulsa la pierna hacia adelante y el talón derecho se flexiona permitiendo a la persona colocar el peso de su parte derecha en el pie.
- La rodilla derecha levanta el pie derecho, preparando la pierna para que la cadera derecha la impulse hacia adelante. Luego se repite desde el paso C con la respectiva pierna.

De este análisis se puede concluir que la mayoría del tiempo se encontrará operando entre 3 y 6 de estas articulaciones.

El sistema de exoesqueleto cuenta con 3 motores por pierna, los cuales emulan las articulaciones de: cadera, rodilla y tobillo. Dado el análisis anterior y teniendo en cuenta que al trabajar los motores al 100 % podría producir daños en las articulaciones de la persona, se estima que

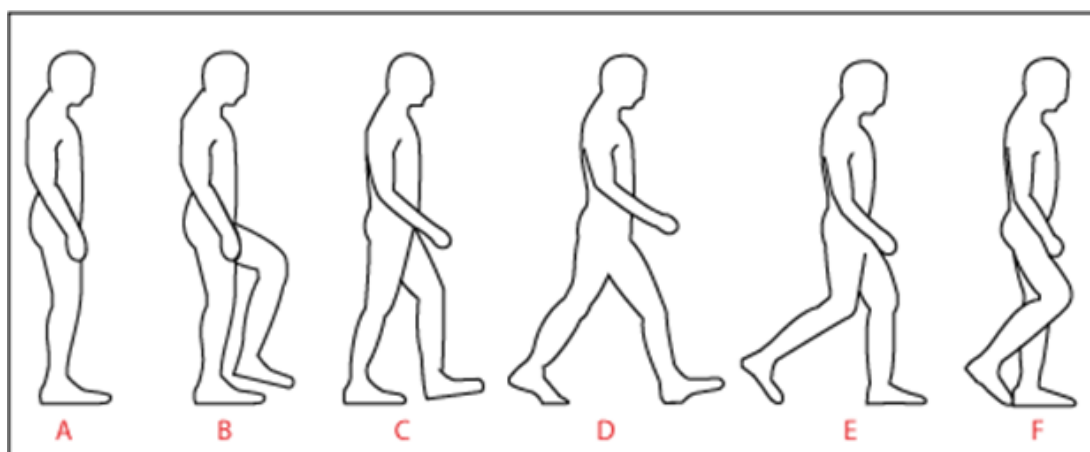


Figura 3.15: Andar de una persona

Fuente: Autores

los motores se encontraran trabajando a un 70 % de su capacidad, ya que la idea es usar el exoesqueleto para brindar rehabilitación a personas que dispongan cierto grado de movilidad en sus piernas, lo que ayuda en cierta forma a reducir el consumo energético por parte de los motores.

Se tiene entonces que el consumo de corriente se reduce a 16,812 Ah. Dada esta corriente para cubrir la autonomía planteada anteriormente se necesitará un banco de baterías con una capacidad de al menos 25,233 Ah.

### 3.10.3. Baterías 26Ah Prismatic Pouch Cell

Las baterías seleccionadas para el proyecto corresponden a las celdas 26 Ah Prismatic Pouch Cell la cual es la celda NMC más poderosa de la marca A123 SYSTEMS [30]. La celda 26Ah está equipada para ofrecer un excelente rendimiento, con una sobresaliente tolerancia al abuso, incluso bajo las pruebas más rigurosas. El empaquetado es conveniente para los módulos existentes de A123 SYSTEMS y fácilmente escalable para múltiples aplicaciones. [30]. La Figura 3.16 presenta la batería 26Ah Prismatic Pouch Cell.

Las principales especificaciones de la celda se resumen en la Tabla 3.5.

Se tiene entonces que el banco de baterías estará constituido por 8 celdas 26h A123 system conectadas en serie, proporcionando un voltaje nominal de 29.6 V. Con esta capacidad, el sistema tendrá una autonomía aproximada de 90 minutos bajo condiciones normales de operación



Figura 3.16: Batería 26h A123 system  
Fuente: [30]

(andar a una velocidad aproximada de 0.25 m/s para una persona en rehabilitación).





Tabla 3.5: Características de la celda 26Ah

Dimensiones de la celda (mm)	161 x 227 x 7,5
Peso de la celda (g)	550
Capacidad de la celda (Ah)	26
Voltaje Nominal (V)	3,7
Voltaje Máximo*	4.15
Voltaje Mínimo*	2.8
Energía Nominal (Wh)	97
Volumen (cc)	274
Temperatura de almacenamiento	-40 @ +60 ° C
Temperatura de operación	-30 @ 55 ° C

\*Valores típicos indicados, la temperatura y la carga afectan los valores.

Fuente: [31]



## Capítulo 4

# Sistema de Gestión de Energía

Este capítulo presenta los bloques principales que conforman el Sistema de Gestión de Energía, haciendo énfasis en cómo trabajan y la manera en que deben ser configurados los dispositivos. Finalmente, se incluye un esquema y explicación de la futura conexión de las diferentes partes que conformarán el sistema y cómo éste funciona.

## 4.1. Configuración de las Celdas en el Banco de Baterías

Como se mencionó anteriormente, los motores requieren de un voltaje mínimo de 24 V para funcionar, en vista de que se poseen baterías de 3.7 V (voltaje nominal), es necesario realizar una conexión en serie de las baterías para así obtener el voltaje necesario para la alimentación.

En nuestro caso, al ser 8 baterías se tiene un voltaje total de 29.6 V, el cual es suficiente para la alimentación de los motores. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que el voltaje mínimo, según la Tabla 3.5 es de 2.8 V dando un total de 22.4 V, el cual es insuficiente para los requerimientos de energía de los motores, por lo tanto, es necesario definir un nuevo nivel de voltaje mínimo en las baterías que permita obtener los 24 V, este es 3 V por celda.

Como se ha definido un nuevo valor de voltaje mínimo, y en vista de que no es posible modificar las características de la celda, es necesario incluir este nuevo límite en el algoritmo de BMS del microcontrolador.

## 4.2. Circuito Integrado LTC6802-2

El CI LTC6802-2 se encargará de monitorear las celdas y su temperatura. Para ello es necesario conocer como está configurado y cuales deben ser los comando a usarse para que este dispositivo realice una tarea específica.

### 4.2.1. Configuración de pines del Integrado BMS

En la Figura 4.1 se presentan los pines que componen el integrado. Estos cumplen las siguientes funciones:

- Pin 1 (V+): Es el pin de alimentación del integrado, debe ir conectado al terminal positivo del banco de baterías. Acepta un rango de entre 10 a 60 V.
- Pines 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 (Ci): Los pines C1 hasta C12 son los pines de entrada del voltaje de las celdas. El terminal positivo de la Celda 1 debe conectarse a C1, el terminal positivo de la Celda 2 debe conectarse a C2 y así sucesivamente como se muestra en la Figura 4.2.
- Pines 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25 (Si): Los pines S1 al S12 son usados para el balanceo de las celdas. Cada uno de estos pines posee internamente un MOSFET que se usa para descargar las celdas a través de una resistencia externa como se muestra en la Figura 4.2.

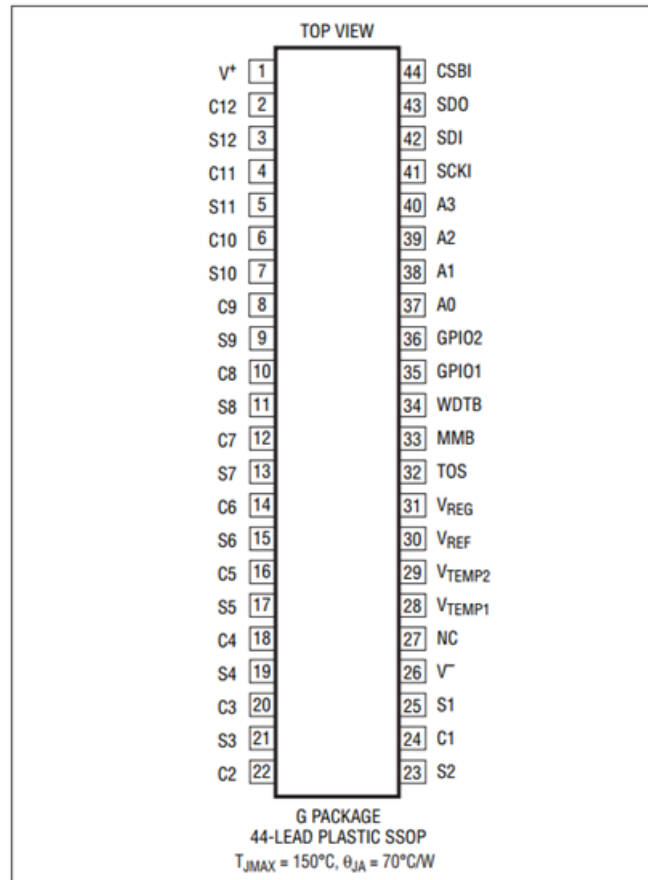


Figura 4.1: Distribución de pines del integrado

Fuente: [4]

- Pin 26 (V<sup>-</sup>): Es el pin de tierra. El menor potencial (terminal negativo del banco de baterías) debe conectarse a este pin, como se indica en la Figura 4.2.
- Pin 27 (NC): Este pin está conectado internamente a V<sup>-</sup>, puede dejarse suelto o conectarse al pin 26.
- Pines 28, 29 (V<sub>TEMP1</sub>, V<sub>TEMP2</sub>): Pines de Sensor de entrada de temperatura. Es necesario conectar un termistor externo por cada entrada, para así poder medir temperatura. El ADC medirá el voltaje en Vtemp<sub>x</sub> con respecto a V<sup>-</sup> y almacenará los resultados en el registro TMP. En general estos pines pueden ser usados como entradas analógicas de hasta 5.5 V.
- Pin 30 (V<sub>REF</sub>): Pin que entrega un voltaje de referencia de 3.075 V. En general se usa para alimentar el circuito de medición de temperatura.
- Pin 31 (V<sub>REG</sub>): Salida de voltaje regulado. Entrega 5.5 V y hasta 4 mA para una carga externa. No debe usarse como sumidero de corriente.

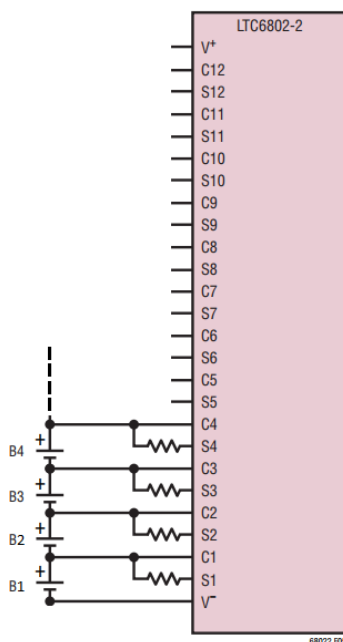


Figura 4.2: Conexión de resistencias externas al LTC6802-2 para balanceo

Fuente: [4]

- Pin 32 (TOS): Este pin debe ser conectado a V+ o V-, dependiendo del modo de comunicación [SPI](#).
- Pin 33 (MMB): Activación del modo monitoreo. Si se conecta a V- el integrado entra en el modo monitoreo.
- Pin 34 (WDTB): Watchdog timer. Pin activo en bajo. Si no detecta actividad por más de 2.5 segundos en el pin SCKI, el WDTB reinicia al integrado a las configuraciones por defecto.
- Pines 35, 36 (GPI01, GPI02): Pines de entrada y salida de propósitos generales. La operación de estos pines depende del estado del pin MMB. Si MMB está en alto, los pines se comportan como GPIOs tradicionales. Si MMB está en bajo, los pines GPIO y WDTB son usados para determinar el número de celdas a ser monitoreadas.
- Pines 37, 38, 39, 40 (A0, A1, A2, A3): Pines de identificación del integrado. Estos deben ser conectados a V+ o V- para determinar la dirección ([ID](#)) del dispositivo.
- Pin 41 (SCK): Es el pin SCK de la comunicación [SPI](#).
- Pin 42 (SDI): Es el pin SDI de la comunicación [SPI](#).
- Pin 43 (SDO): Pin SDO de la comunicación [SPI](#).
- Pin 44 (CSBI): Pin CSBI de la comunicación [SPI](#).

#### 4.2.2. Principio de Operación del CI LTC6802-2

El LTC6802-2 es un **CI** de adquisición de datos capaz de medir el voltaje de 12 celdas conectadas en serie. Emplea un multiplexor de entrada que conecta las baterías a un convertidor analógico a digital delta-sigma de 12 bits (**ADC**).

La principal ventaja de emplear un **ADC** delta-sigma frente a otros tipos de **ADC**, por ejemplo el de aproximación sucesiva (**SAR**), es que la entrada se muestrea muchas veces a lo largo de una conversión y luego se filtra o se promedia para producir el código de salida digital. Por el contrario, un convertidor **SAR** toma una sola instantánea del voltaje de entrada y luego realiza la conversión en esta única muestra. Es posible filtrar la entrada, pero si el convertidor se multiplexa para medir varios canales de entrada, se requerirá un filtro por separado para cada canal. Un filtro de baja frecuencia no puede residir entre un multiplexor y un **ADC** y lograr una alta tasa de exploración en múltiples canales [4].

La comunicación entre el integrado LTC y un microcontrolador se realiza a través de la interfaz **SPI**. Múltiples LTC6802-2 se pueden conectar a una única interfaz, esto se logra gracias a los pines A0, A1, A2 y A3, los cuales sirven de identificación para el integrado. Estos entregan, en conjunto, un número de 4 bits, que representan el estado de conexión de estos pines, es decir si el pin  $A_x$  está conectado a **GND** su correspondiente bit será un 0, en cambio si se conecta a 5 V, el bit tendrá el valor de 1. De esta forma se pueden conectar hasta 16 LTC6802-2 a un mismo microcontrolador, permitiendo monitorear hasta 192 celdas. Cabe recalcar que para usar más de un LTC6802-2 se debe colocar un aislador digital entre el microcontrolador y cada LTC6802-2. En el anexo A.1 se presenta un esquema de conexión de 3 LTC6802-2 a un mismo microcontrolador usando un aislador digital [4].

El LTC6802-2 contiene circuitos para equilibrar los voltajes de las celdas. Posee MOSFET internos que se pueden usar para descargar celdas. Estos MOSFET internos también se pueden usar para controlar circuitos de balanceo externos.

La Figura A.1 del anexo A ilustra el balanceo de celdas por descarga interna, en el cual una resistencia externa limita la cantidad de corriente a ingresar por el pin  $S_i$ . Sin embargo [4] recomienda realizar un balanceo externo a través del circuito de la Figura 4.3. En este esquema se indica como el pin  $S_n$  controla el circuito de balanceo externo al enviar un 0 lógico lo que activa el transistor SI1235DS permitiendo que la celda se descargue a través de la resistencia de 15  $\Omega$ .

Es importante tener en cuenta que el LTC6802-2 no toma decisiones sobre encender o apagar los MOSFET internos. Esto es completamente controlado por un microcontrolador externo. El microcontrolador escribe valores en un registro de configuración dentro del LTC6802-2 para

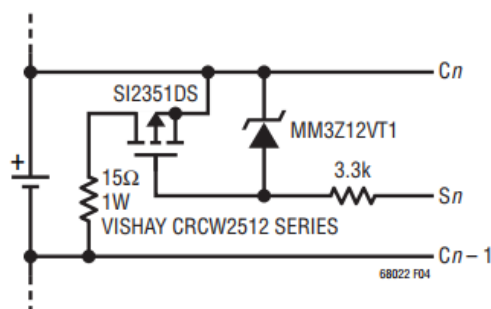


Figura 4.3: Esquema de un circuito para balanceo externo

Fuente: [4]

controlar los conmutadores. El temporizador watchdog en el LTC6802-2 se puede usar para apagar los interruptores de descarga si se interrumpe la comunicación con el microprocesador. Si no se detecta comunicación entre el integrado y el microcontrolador en un tiempo igual a 2.5 segundos, el watchdog timer reseteará el integrado a su configuración por defecto, es decir, entrará en el modo standby [4].

El watchdog timer es útil, por ejemplo, en el caso de que el microcontrolador indique al integrado LTC6802-2 que inicie el balanceo de celdas, si el watchdog se encuentra deshabilitado y se produce una pérdida de comunicación, el balanceo se realizará de forma indefinida, pues el microcontrolador no podrá indicar que se termine el balanceo. En el caso de que el watchdog se encuentre activo, cuando se pierda la comunicación, el integrado pasará al modo standby, deteniendo el balanceo, la medición de voltaje y la medición de temperatura de las celdas, pasando únicamente a la espera de que se recupere la comunicación.

### 4.2.3. Balanceo de Celdas

En cuanto al balanceo de celdas, el integrado LTC6802-2 posee dos formas de realizar esta función, la primera es un balanceo continuo, usando el registro STCVDC, que consiste en balancear las celdas en todo momento, inclusive cuando se toma una medición del voltaje de dicha celda. El otro modo es el modo de balanceo discontinuo, el cual apaga el balanceo de una celda cuando se va a tomar una medición del voltaje de la misma, esto se hace mediante el registro STCVAD. Este último método es deseable en la mayoría de casos, ya que permite medir el voltaje de la celda sin la carga, es decir, el voltaje real al cual se encuentra la celda.

A su vez el balanceo puede ser interno, Figura 4.2, en donde las celdas se descargan a través de MOSFET internos usando una resistencia externa para delimitar la corriente, o externo

usando el circuito de la Figura 4.3, en donde las celdas se descargan a través de una resistencia externa que cortocircuita una celda específica. El uso del balanceo interno o externo depende de la capacidad de las celdas, para celdas con poca capacidad, 1 Ah, se recomienda un balanceo interno, para celdas de gran capacidad, mayor a 1 Ah, se recomienda un balanceo externo [4].

#### 4.2.4. Uso del LTC6802-2 con menos de 12 celdas

El LTC6802-2 está diseñado para trabajar con un máximo de 12 celdas hasta 60 V y un mínimo de 4 Celdas desde 10 V.

La Figura 4.4 muestra cómo conectar menos de 12 celdas al integrado, en este caso 7 celdas. El mayor potencial debe ir conectado al pin V+ y a los pines  $C_i$  restantes. Para nuestro sistema es necesario conectar 8 celdas, cuya configuración se realiza de la misma forma.

El integrado puede realizar la medición de 12 o 10 celdas. En el caso de usar menos de 11 se recomienda medir únicamente 10 [4], esto se logra a través del bit CELL10 del registro de control. Para el ejemplo de la Figura 4.4, cuando se midan los voltajes de cada celdas, las celdas 8, 9, 10, 11 y 12 tendrán el mismo valor que la celda 7.

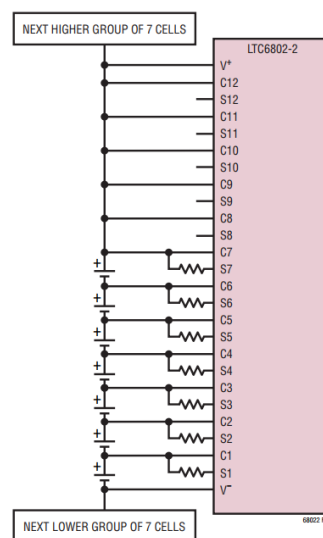


Figura 4.4: Conexión de 7 celdas al LTC6802-2

Fuente: [4]



### 4.2.5. Modos de Operación

El integrado LTC6802-2 posee 3 modos de operación: standby, medición y monitoreo. Cada uno de estos se selecciona de acuerdo a la función que se desee que realice el integrado.

#### 4.2.5.1. Modo Standby

Es el modo por defecto. Se caracteriza por ser el modo de menor consumo, en donde todos los circuitos y funciones están apagadas excepto la interfaz serial y el regulador de voltaje de alimentación. Este estado puede ser programado mediante los bits de configuración CDC0, CDC1 y CDC2, colocándolos en 0 [4].

Si en un momento determinado el integrado es puesto en el modo standby, las mediciones y conversiones serán interrumpidas [4].

#### 4.2.5.2. Modo Medición

El modo medición, como su nombre lo indica, permite medir los voltajes de las celdas, además de activar los circuitos de conversión y balanceo y medir la temperatura dada por los termistores. Para entrar en este modo se debe escribir un valor diferente de 0 en los registros CDC[2:0] [4].

Permite designar los voltajes máximos y mínimos de las celdas, de esta manera se puede desactivar de forma automática el balanceo de las celdas [4].

La información de voltaje de celdas y temperatura obtenidas por el LTC6802-2 se envía al microcontrolador externo usando la interfaz [SPI](#).

#### 4.2.5.3. Modo Monitoreo

En este modo la interfaz serial estará deshabilitada y el integrado se limita únicamente a medir los voltajes de las celdas. Para entrar en este modo es necesario colocar en bajo el pin MMB [4].

Como no hay una comunicación con un microcontrolador externo, para poder definir el número de celdas a monitorear es necesario emplear los pines WDTB, GPIO2 y GPIO1, como se muestra en la Tabla [4.1](#).

Tabla 4.1: Selección de Celdas a Monitorear

WDTB	GPIO2	GPIO1	CELDAS A MONITOREAR
0	0	0	Celdas 1 a 5
0	0	1	Celdas 1 a 6
0	1	0	Celdas 1 a 7
0	1	1	Celdas 1 a 8
1	0	0	Celdas 1 a 9
1	0	1	Celdas 1 a 10
1	1	0	Celdas 1 a 11
1	1	1	Celdas 1 a 12

Fuente: [4]

#### 4.2.6. Registros y Comandos de Configuración

La comunicación con el integrado LTC6802-2 se la realiza a través de 2 tipos de datos: comandos y registros. El integrado posee 12 diferentes comandos que deben ser enviados previamente a los valores de los registros a configurar, pues estos indican a qué posiciones de memoria desplazarse [4].

En la Tabla 4.2.6, se presentan los 12 comandos disponibles en el LTC6802-2.

Tabla 4.2: Comandos disponibles en el LTC6802-2

Fuente: [4]

Comando	Valor Hexadecimal	Descripción
WRCFG	0x01	Escritura de registro de configuración
RDCFG	0x02	Lectura de registro de configuración
RDCV	0x04	Lectura de voltajes de celdas
RDFLG	0x06	Lectura de banderas
RDTMP	0x08	Lectura de registros de temperatura (termistores)
STCVAD	0x10 (all cell voltage) 0x11 (cell 1 only) 0x12 (cell 2 only) ... 0x1A (cell 10 only) 0x1B (cell 11 only, if CELL10 bit=0) 0x1C (cell 12 only, if CELL10 bit=0) 0x1D (unused)	Inicio de la conversión A/D (depende del valor cargado)



Comando	Valor Hexadecimal	Descripción
STOWAD	0x20 (all cell voltage inputs) 0x21 (cell 1 only) 0x22 (cell 2 only) ... 0x2A (cell 10 only) 0x2B (cell 11 only, if CELL10 bit=0) 0x2C (cell 12 only, if CELL10 bit=0)	Inicio de la conversión A/D con una o más celdas en circuito abierto (depende del valor cargado)
STTMPAD	0x30 (all temperature inputs) 0x31 (external temp 1 only) 0x32 (external temp 2 only) 0x33 (internal temp only) 0x34—0x3D (unused)	Inicio de la conversión A/D de la lectura de temperatura.
STCVDC	0x60 (all cell voltage inputs) 0x61 (cell 1 only) 0x62 (cell 2 only) ... 0x6A (cell 10 only) 0x6B (cell 11 only, if CELL10 bit=0) 0x6C (cell 12 only, if CELL10 bit=0) 0x6D (unused)	Inicio de la conversión A/D de los voltajes de las celdas, con descarga de celdas permitida (depende del valor cargado)
STOWDC	0x70 (all cell voltage inputs) 0x71 (cell 1 only) 0x72 (cell 2 only) ... 0x7A (cell 10 only) 0x7B (cell 11 only, if CELL10 bit=0) 0x7C (cell 12 only, if CELL10 bit=0) 0x7D (unused)	Inicio de la conversión A/D de los voltajes de las celdas, con una o más celdas en circuito abierto, con descarga de celdas permitida (depende del valor cargado)

Cada comando posee un grupo específico de registros, los cuales, para obtener valores de voltajes, temperaturas, banderas, etc.; deben ser configurados y/o escritos. En la Tabla 4.3 se presentan los comandos de configuración del LTC6802-2. En el anexo A.2 se presentan los registros de lectura de voltajes y temperatura.

Para entender qué hace cada uno de los registros de las tablas antes mencionadas, es necesario referirse a la descripción de la memoria de bits que se presenta en las Tablas 4.4 y 4.5.

Una vez identificados los comandos y registros es necesario determinar la manera correcta de

Tabla 4.3: Registros de configuración del LTC6802-2

REGISTRO	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
CFGR0	RD/WR	DCC8	DCC7	DCC6	DCC5	DCC4	DCC3	DCC2	DCC1
CFGR1	RD/WR	WDT	GPIO2	GPIO1	LVLPL	CELL10	CDC[2]	CDC[1]	CDC[0]
CFGR2	RD/WR	MC4I	MC3I	MC2I	MC1I	DCC12	DCC11	DCC10	DCC9
CFGR3	RD/WR	MC12I	MC11I	MC10I	MC9I	MC8I	MC7I	MC6I	MC5I
CFGR4	RD/WR	VUV[7]	VUV[6]	VUV[5]	VUV[4]	VUV[3]	VUV[2]	VUV[1]	VUV[0]
CFGR5	RD/WR	VOV[7]	VOV[6]	VOV[5]	VOV[4]	VOV[3]	VOV[2]	VOV[1]	VOV[0]

Fuente: [4]

Tabla 4.4: Memoria de bits

Name	Description	Values
CDC	Comparator Duty Cycle	* Ver tabla Valores CDC
CELL10	10-Cell Mode	0=12-cell mode (default); 1=10-cell mode
LVLPL	Level Polling Mode	0=toggle polling (default); 1=level polling
GPIO1	GPIO1 Pin Control	Write: 0=GPIO1 pin pull down on; 1=GPIO1 pin pull down off (default) Read: 0=GPIO1 pin at logic '0'; 1=GPIO1 pin at logic '1'
GPIO2	GPIO2 Pin Control	Write: 0=GPIO1 pin pull down on; 1=GPIO1 pin pull down off (default) Read: 0=GPIO2 pin at logic '0'; 1=GPIO2 pin at logic '1'
WDT	Watchdog Timer	Read Only: 0=WDTB pin at logic '0'; 1=WDTB pin at logic '1'
DCCx	Discharge Cell x	x=1..12 0=turn off shorting switch for cell 'x' (default); 1=turn on switch
VUV	Undervoltage Comparison Voltage*	Comparison voltage = $VUV * 16 * 1.5mV$ (default VUV=0. When MMB pin is low a factory programmed comparison voltage is used)
VOV	Overvoltage Comparison Voltage*	Comparison voltage = $VOV * 16 * 1.5mV$ (default VOV=0. When MMB pin is low a factory programmed comparison voltage is used)
MCxI	Mask Cell x Interrupts	x=1..12 0=enable interrupts for cell 'x'(default) 1=turn off interrupts and clear flags for cell 'x'
CxV	Cell x Voltage*	x=1..12 12-bit ADC measurement value for cell 'x' cell voltage for cell 'x' = $CxV * 1.5mV$ reads as 0xFFF while A/D conversion in progress
CxUV	Cell x Undervoltage Flag	x=1..12 cell voltage compared to VUV comparison voltage 0=cell 'x' not flagged for under voltage condition; 1=cell 'x' flagged
CxOV	Cell x Overvoltage Flag	x=1..12 cell voltage compared to VOV comparison voltage 0=cell 'x' not flagged for over voltage condition; 1=cell 'x' flagged
ETMPx	External Temperature Measurement*	Temperature measurement voltage = $ETMPx * 1.5mV$
THSD	Thermal Shutdown Status	0= thermal shutdown has not occurred; 1=thermal shutdown has occurred Status cleared to '0' on read of Thermal Register Group
REV	Revisión Code	Device revision code
ITMP	Internal Temperature Measurement*	Temperature measurement voltage = $ITMP * 1.5mV = 8mV * T(^{\circ}K)$
PEC	Packet Error Code	CRC value for reads

\*Voltage determinations use the decimal value of the registers, 0 to 4095 for 12-bit and 0 to 255 for 8-bit registers

Fuente: [4]

Tabla 4.5: Valores del Registro CDC

CDC	UV/OV COMPARATOR PERIOD	$V_{REF}$	CELL VOLTAGE MEASUREMENT TIME
0	N/A (Comparator off) Standby Mode	YES	N/A
1	N/A (Comparator off)	NO	13ms
2	13ms	NO	13ms
3	130ms	NO	13ms
4	500ms	NO	13ms
5	130ms	YES	21ms
6	500ms	YES	21ms
7	2000ms	YES	21ms

Fuente:[4]

escribirlos y/o leerlos. La data técnica del LTC6802-2 (en la página 24) presenta un ejemplo de cómo realizar la comunicación serial. Estos pasos, que debe seguir el microcontrolador, se indican a continuación.

A. Escritura de los registros de configuración (Comando Broadcast)

1. Colocar el pin CSBI en bajo.
2. Enviar el comando WRCFG.
3. Enviar el registro (byte) CFGR0, luego el CFGR1, ... , CFGR5.
4. Colocar el pin CSBI en alto.

B. Lectura de los registros de voltajes de celdas (Comando de dirección)

1. Colocar el pin CSBI en bajo.
2. Enviar la dirección del dispositivo del cual queremos leer los registros.
3. Enviar el comando RDCV.
4. Leer el registro (byte) CVR00, luego CVR01, ... , CVR17.
5. Colocar en alto el pin CSBI.

C. Inicio de la conversión A/D de los voltajes de las celdas

1. Colocar el pin CSBI en bajo.
2. Enviar el comando STCVAD.
3. Esperar al menos 12 ms a que la conversión se realice.
4. Colocar en alto el pin CSBI.

En el ejemplo anterior se habla de comandos broadcast y comandos de dirección, estos son una subdivisión de los comandos. Un comando broadcast es un comando que se envía desde el dispositivo maestro (el microcontrolador) hacia todos los dispositivos esclavo (integrado

LTC6802-2), en cambio un comando de dirección es un comando que se envía específicamente a un sólo dispositivo esclavo, para ello se implementa la dirección del dispositivo dada por los pines A0, A1, A2 y A3 [4].

Para enviar un comando broadcasts basta con enviar el comando, siguiendo los pasos indicados en el ejemplo, seguido de los correspondientes registros, como se indica en la Figura 4.5. Para enviar un comando de dirección primero se envía un byte con los 4 bits más significativos el valor binario 1000 seguido de los 4 bits de dirección del dispositivo (valor en los pines A0...A3) posteriormente se envía el comando y registros correspondientes [4], esto se indica en la Figura 4.6.

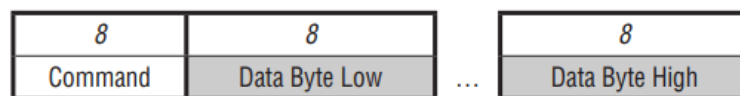


Figura 4.5: Envío de los comandos Broadcast  
Fuente: [4]

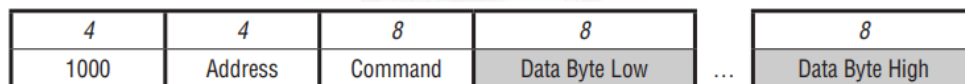


Figura 4.6: Envío de comandos a un dispositivo específico  
Fuente: [4]

#### 4.2.7. Comunicación Serial

El integrado LTC6802-2 posee un puerto serial compatible con la interfaz **SPI** al cual se puede conectar directamente a un microcontrolador. Se tiene la opción de conectar más LTC6802-2 de forma paralela usando aisladores digitales. La manera que le microcontrolador identifica el dispositivo de forma exclusiva es mediante la dirección determinada por los pines A0 a A3 [4].

El integrado LTC6802-2 posee los 4 pines necesarios para la comunicación **SPI**: CSBI, SCKI, SDI y SDO. El modo **SPI** usado (fase y polaridad de reloj) está configurado para operar con **CPHA** =1 y **CPOL** =1, lo cual representa el modo 3 de la comunicación **SPI**. La frecuencia usada para esta comunicación debe ser de 1 kHz.

Cada dato a transmitirse consta de 8 bytes, siendo el más significativo el primero en enviarse. Este dato es colocado en el bus durante el flanco de bajada y es leído en el siguiente flanco de subida del reloj, como se indica en la Figura 4.7.

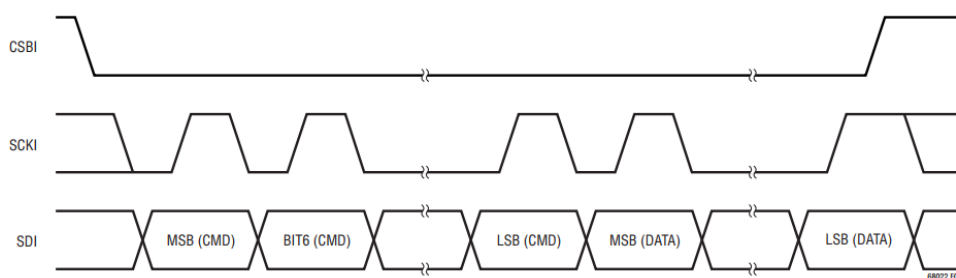


Figura 4.7: Transmisión de un dato usando la interfaz SPI

Fuente: [4]

### 4.3. Cargador de Baterías

Luego de ser usado el banco de baterías es necesario recargar las celdas. Para esta acción se requiere de un cargador que provea de un voltaje igual o superior al obtenido por el banco de baterías. El cargador suministrado por la dirección del proyecto es el PB-360P-24 [32], presentado en la Figura 4.8.



Figura 4.8: Cargador PB-360P-24

Fuente: [32]

#### 4.3.1. Características del Cargador PB-360P-24

El PB-360-24 es un cargador de una sola salida de 360 W (28.8 V y 12.5 A). Sus principales características son:

- Cargador de baterías de plomo ácido y baterías de ion de litio.
- Tres escenarios de carga.
- Dos terminales para conexión de las baterías.
- Dos pines de control que sirven para detener la carga o determinar el escenario en que se encuentra el cargador.
- Voltaje de entrada de 115/230 AC.
- Protecciones: Sobre voltaje, sobre temperatura, Corto Circuito, Polarización Inversa.
- Led indicador de 2 colores.
- Interruptor de parada de carga.
- Voltaje de salida ajustable, desde 26 a 28.8 V
- Corriente máxima de salida de 12.5 A
- Eficiencia del 86 %
- Temperatura de funcionamiento entre -20 @ +60 °C

#### 4.3.2. Estados de Carga

El cargador PB-360-24 posee 3 estados de carga determinados por el estado de carga de las baterías, esto son:

1. Flotante: Cuando las baterías se han cargado el cargador entra en este estado. A su salida se presenta un voltaje de 27.7 V aproximadamente, el indicador led se ilumina de color verde con baja intensidad y el pin de control remoto entrega un voltaje, con respecto a tierra, de 5 V aproximadamente.
2. Cargando: Estado que se presenta cuando se encuentra realizando la carga. El indicador led se ilumina en rojo, a la salida se tiene el voltaje máximo seleccionado y en el pin de control se presenta un voltaje aproximado de 17 V.
3. Sin Baterías: Cuando el cargador no detecta ninguna batería conectada el indicador led se iluminará en verde con una alta intensidad, a la salida del cargador se tiene un voltaje aproximado de 27.7 V y el pin de control entregará un voltaje de 11 V aproximadamente.

#### 4.3.3. Funcionamiento del Cargador

En el primer escenario el cargador proporciona aproximadamente 25.5 V con una corriente máxima de 12.5 A [32]. El indicador led se iluminará en rojo y el ventilador comenzará a girar para disipar el calor. Después de un tiempo, dependiendo de la capacidad de las baterías, el cargador entra en el segundo escenario en donde la corriente disminuirá gradualmente. Luego de llegar a un valor del 10 % de su valor máximo, el cargador entrará en el escenario de carga



flotante en donde el ventilador dejará de girar, el voltaje de carga disminuirá a 27.7 V y el indicador led cambiará a verde de baja intensidad [32]. La relación entre la corriente de carga y la tensión de carga para cada etapa de operación se muestra en las curvas de la Figura 4.9.

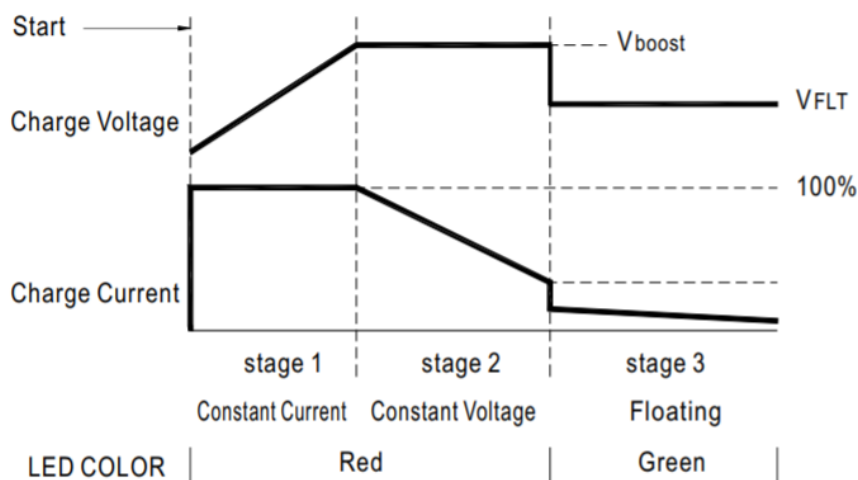


Figura 4.9: Curvas de Voltaje y Corriente durante una carga  
Fuente: [32]

#### 4.4. Diseño del Sistema de Gestión de Energía

El diseño del sistema de gestión de energía sigue el esquema de la Figura 4.10, el cual está conformado por:

- Cargador: Encargado de cargar las baterías.
- Banco de Baterías: Conjunto de celdas en serie. Se emplean para suministrar energía a los drivers controladores de los motores y a los conversores DC-DC.
- Circuito de Balanceo: Circuito encargado de realizar el balanceo externo de las baterías.
- Circuito integrado LTC6802-2: Circuito integrado encargado de monitorear el voltaje y temperatura de las celdas. Este se comunica únicamente con el microcontrolador a través de una interfaz SPI.
- Microcontrolador Arduino Nano: Microcontrolador encargado de controlar el integrado LTC6802-2, recopilar datos de voltaje y temperatura para luego enviarlos por comunicación RS232 al microcontrolador central del exoesqueleto.

- Conversores **DC-DC**: Encargado de tomar el voltaje entregado por el banco de baterías y transformarlo a los voltajes requeridos por sensores y demás componentes.

Hay que indicar que todos estos componentes, con excepción del cargador, irán colocados dentro de una mochila que permita el transporte de las celdas y el sistema de gestión.

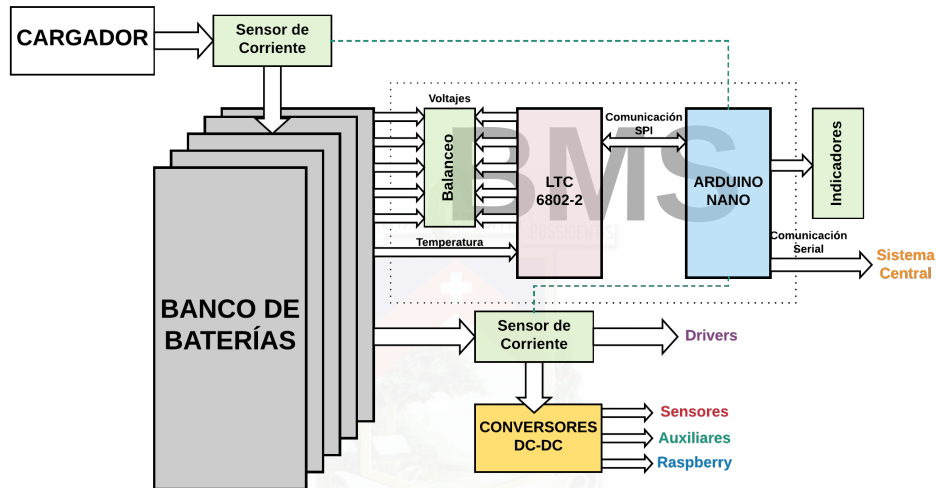


Figura 4.10: Esquema del Sistema de Gestión de Energía a desarrollarse  
Fuente: Autores

#### 4.4.1. Principio de operación

El sistema de gestión de energía operará de la siguiente manera, en primer lugar el microcontrolador envía los comandos de configuración al integrado LTC6802-2, de tal forma que este salga del modo standby y entre en el modo medición. El microcontrolador lee la información de voltaje y temperatura enviados por el integrado. En base a estos datos decide si activar o desactivar el balanceo de celdas, activar una alarma de sobrevoltaje o bajo voltaje. Toda esta información es enviada al microcontrolador central.

Si se llegara a detectar que las celdas están entrando en la zona de descargar, 24 V, el microcontrolador emitirá una alarma auditiva a través de un buzzer y alarma visual a través de un diodo led, de igual forma se envía una alarma al microcontrolador central. De esta forma el usuario deberá usar el cargador de baterías.

El cargador se encuentra ubicado de manera externa al contenedor del sistema, pues este debe



ser conectado a la toma de corriente eléctrica y agregarlo a la mochila significa agregar peso innecesario. Una vez conectado el cargador, el microcontrolador detectará el estado de la carga dado por los pines de control remoto del cargador, permitiendo activar un indicador visual (leds) y un indicador auditivo (buzzer), de tal manera que informen al usuario del estado de carga del banco de baterías.

Por último, el banco de baterías se conecta directamente a los conversores **DC-DC** y a los drivers controladores de los motores. Los conversores alimentan al microcontrolador, el Raspberry (sistema central del exoesqueleto), sensores de los drivers de los motores y cualquier otro componente externo que se requiera conectar al sistema.



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*



## Capítulo 5

# Desarrollo Técnico del Sistema

El presente capítulo muestra el diseño y construcción del Sistema de Gestión de Energía estudiado en los capítulos anteriores, a partir de un conjunto de prototipos desarrollados con el fin de comprobar el comportamiento de los distintos circuitos.

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867

## 5.1. Construcción del Banco de Baterías

### 5.1.1. Configuración de las celdas

El banco de baterías bajo diseño está formado por el conjunto de 8 celdas 26Ah Prismatic Pouch Cell unidas en serie, las cuales están sujetan mecánicamente mediante pernos con métrica M6, con un par de apriete de  $5.1\text{ N} \cdot \text{m}$ , que une los terminales de las distintas celdas obteniendo así una mayor área de contacto para reducir la resistencia de contacto y permitir colocar los conectores para el monitoreo de las celdas de la sección 3.9.2. La conexión entre celdas se realiza en el siguiente orden:

1. Perno m6 de 10 mm.
2. Arandela de 14 mm.
3. Terminal positivo de la Celda<sub>*i*</sub>. (*i*:1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.)
4. Terminal negativo de la Celda<sub>*i+1*</sub>.
5. Arandela de 14 mm.
6. Terminal tipo arandela.
7. Tuerca.

En la Figura 5.1 se observa la conexión de 2 terminales, descrito anteriormente, de las celdas.



Figura 5.1: Unión de dos Celdas  
Fuente: Autores

Este proceso se repite hasta tener todas las celdas conectadas en serie.

El terminal tipo arandela está conectado mediante cable AWG 22 al conector de 10 pines, indicado en 3.9.2, como se aprecia en la Figura 5.2, este se utiliza para monitorear los niveles de voltaje en los que se encuentra cada una de las celdas.

Por último en el terminal negativo de la Celda 1 y en el terminal positivo de la Celda 8 se tiene

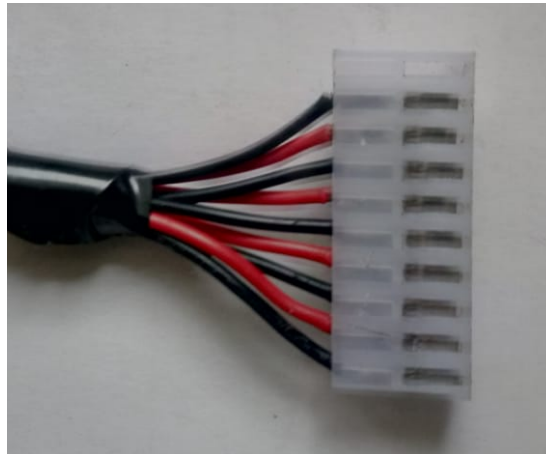


Figura 5.2: Conector para monitoreo de Celdas  
Fuente: Autores

la salida de voltaje del banco de baterías; para esto se utiliza cable AWG 8 y un conector tipo arandela, mencionados en 3.9.3. La conexión se observa en la Figura 5.3.



Figura 5.3: Conexión del cable AWG 8 a una Celda  
Fuente: Autores

### 5.1.2. Construcción del contenedor del Banco de Baterías

Con la finalidad de mejorar la protección de las celdas se construyó un contenedor en tela lona nylon para albergar las 8 celdas, la cual brinda gran resistencia y no es conductora de electricidad. Se colocó una tapa con un cierre de velcro para evitar el contacto con los terminales de las celdas una vez el contenedor se encuentre ubicado dentro de la mochila de transporte. Este contenedor se muestra en la Figura 5.4.



Figura 5.4: Contenedor de Baterías  
Fuente: Autores

Finalmente, el banco de baterías ya armado se muestra en las figuras 5.5 y 5.6 , en donde se observan las las uniones de las Celdas, los 2 cables AWG 8 que entregan el voltaje total del banco (28.6 V como se puede apreciar en la Figura 5.7) y los cables AWG 22 encargados de las muestra de voltajes individuales.



Figura 5.5: Banco de baterías (vista Frontal)  
Fuente: Autores



Figura 5.6: Banco de baterías (vista Superior)  
Fuente: Autores

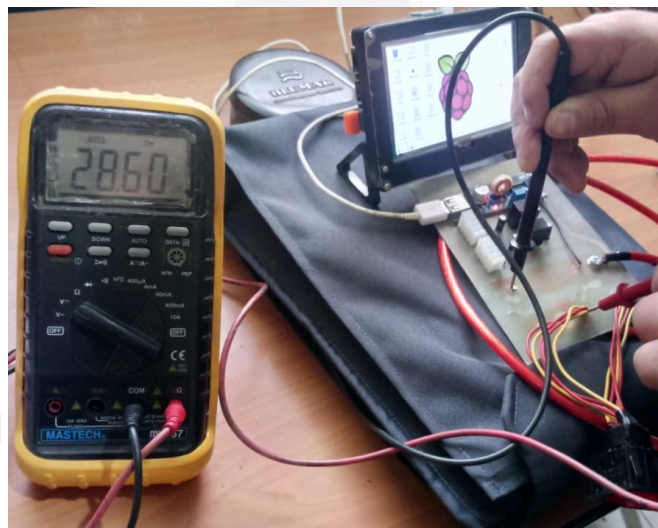


Figura 5.7: Voltaje entregado por el banco de baterías  
Fuente: Autores

### 5.1.3. Caracterización del Banco de Baterías

Como punto final es necesario determinar la resistencia interna que posee cada celda, este valor será de gran ayuda para detectar problemas en las celdas y de esta forma determinar si es tiempo de reemplazarla.[33]

En la Tabla 5.1 se presentan los valores de la resistencia interna de cada celda, estas fueron me-



didadas con el voltaje indicado en esta misma tabla. Como se puede apreciar el valor se encuentra en el rango de  $1\text{ m}\Omega$ , por lo que en teoría representa un bajo nivel de pérdidas.

Tabla 5.1: Resistencia interna de las Celdas

Celda	Voltaje (V)	Resistencia ( $\text{m}\Omega$ )
C1	3.574	1.00
C2	3.573	1.12
C3	3.575	1.06
C4	3.574	1.09
C5	3.574	1.13
C6	3.574	1.12
C7	3.574	1.10
C8	3.574	1.10

Fuente: Autores

## 5.2. Diseño del Sistema de Gestión de Energía

### 5.2.1. Circuitos

El circuito electrónico del sistema de gestión de energía se presenta en la sección C.5, este sistema se divide en 2 sistemas:

- El sistema de gestión del banco de baterías (BMS).
- El sistema de alimentación para el exoesqueleto y su electrónica asociada.

A continuación se explica brevemente cada parte del sistema.

#### 5.2.1.1. Sistema de Gestión del Banco de Baterías

En esta parte del sistema se realiza el monitoreo de: voltaje, corriente y temperatura, se realiza el balanceo de carga de las celdas, estimación del estado de carga (SoC) y el estado de salud (SoH) del banco de baterías, además de la comunicación con el sistema central.

Para el balanceo de carga de las celdas se utiliza un balanceo pasivo mediante resistencias conmutadas, descrito en la sección 2.6.1. En la Figura 5.8 se presenta el circuito utilizado.

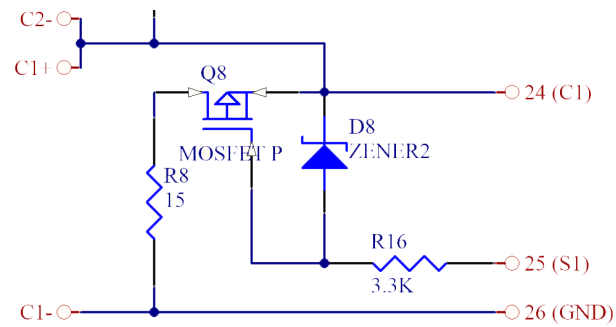


Figura 5.8: Circuito esquemático para el balanceo pasivo  
Fuente: Autores

Se utiliza una resistencia de  $15\ \Omega$  como resistencia de descarga, la misma permite una descarga de la celda a  $0,01\ C$ , evitando así deterioro de las celdas cuando se realice el balanceo de las mismas.

Se implementa el circuito de la Figura 5.8 para todas las 8 celdas, los mismo que son conmutados por el CI LTC6802-2 mediante los pines  $S_i$  ( $i= 1, 2, 3..., 12$ ).

Para el monitoreo de voltajes de las celdas y temperatura del banco de baterías se utiliza el CI LTC6802-2, el cual permite monitorear los voltajes de las celdas mediante los pines  $C_i$  ( $i= 1, 2, 3..., 12$ ), y las temperaturas desde los pines  $V_{TEMP}$  y  $V_{TEMP2}$  utilizando los termistores descritos en 3.6.1. En la Figura 5.9 se observa los pines descritos con anterioridad.

Para el monitoreo de las temperaturas es necesario utilizar un circuito divisor de tensión, el cual se indica en la Figura 5.10. Este circuito es alimentado por el CI LTC6802-2 mediante los pines  $V_{REG}$  y  $V_{REF}$ .

Los datos tanto de voltaje como de temperatura son enviados mediante comunicación SPI hacia el microcontrolador Arduino Nano. La comunicación se realiza mediante los pines 41, 42, 43, 44 del CI LTC6802-2 y los pines D10, D11, D12, D13 del microcontrolador. Es necesario colocar resistencias pull up entre la alimentación del microcontrolador y los pines D12 y D13.

Para el monitoreo de la corriente entregada y recibida por el banco de baterías se utiliza el sensor ACS712, descrito en 3.6.2, el cual se comunica mediante un puerto analógico con el microcontrolador. Se coloca 2 sensores de corrientes:

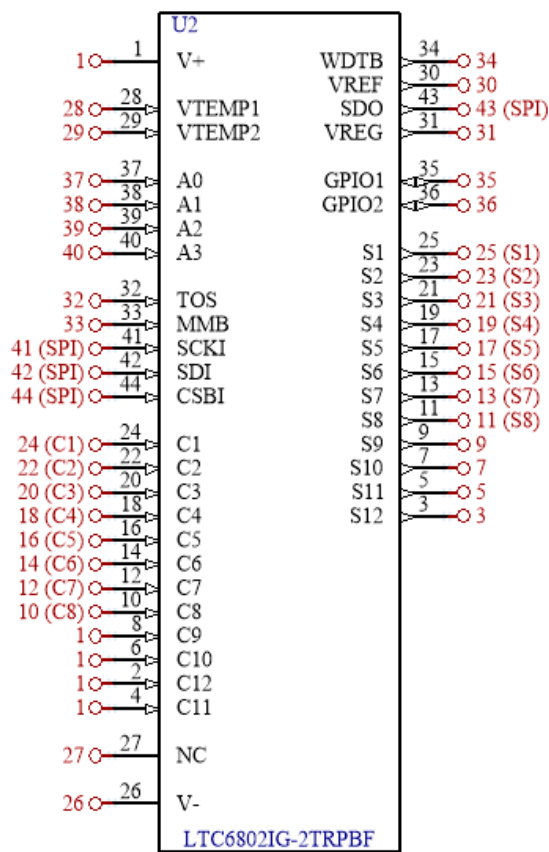


Figura 5.9: CI LTC6802-2 circuito esquemático  
Fuente: Autores

1. Monitorear el consumo de energía hacia el exoesqueleto.
2. Monitorear la entrega de energía en el proceso de carga.

En la sección [C.5](#) se observa la disposición de estos sensores en el [PCB](#) final.

El sistema tiene 5 indicadores visuales (diodos LED) los cuales son:

1. Proceso de carga terminado.
2. Banco de baterías en proceso de carga.
3. Estado de carga alto (más de 27 V).
4. Estado de carga medio (entre 27 V y 25 V).
5. Estado de carga bajo (por debajo de 25 V).

Adicionalmente se cuenta con un indicador sonoro (buzzer) el cual tiene 2 estados:

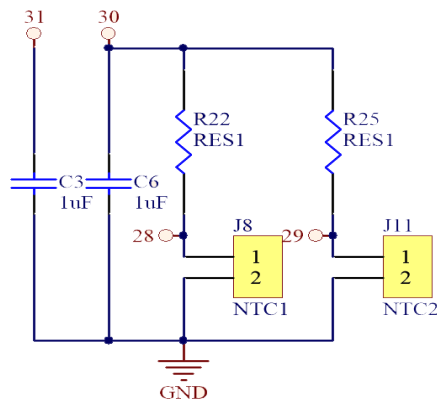


Figura 5.10: Circuito esquemático para el monitoreo de temperaturas  
Fuente: Autores

1. Emite un sonido intermitente cuando el estado de carga del banco de baterías es bajo.
2. Emite un sonido continuo cuando se ha completado un proceso de carga del banco de baterías.

El circuito de estos indicadores se presenta en la Figura 5.11.

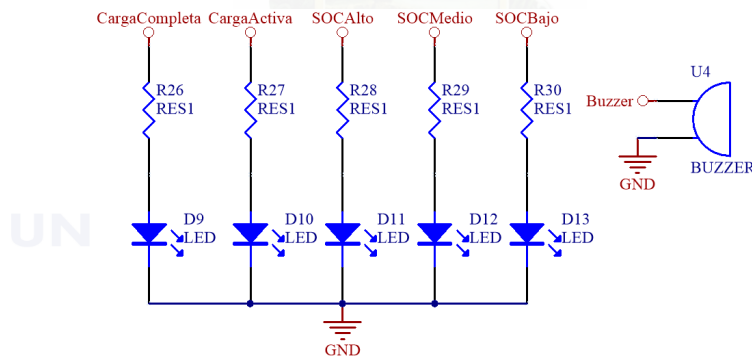


Figura 5.11: Circuito esquemático para los indicadores visuales e indicador sonoro  
Fuente: Autores

Estos indicadores son activados por el microcontrolador mediante sus salidas digitales.

Para determinar el estado en el cual se encuentra el cargador, cuando se realiza un proceso de carga, se utiliza el pin auxiliar ubicado en el cargador, el cual proporciona un distinto nivel de voltaje de acuerdo al estado del cargador, por lo cual se utiliza un circuito divisor de tensión, indicado en la Figura 5.12, el cual envía una señal a un puerto analógico del microcontrolador.

En la Figura 5.13, se presenta el esquema del microcontrolador en donde se presenta la conexión para la comunicación SPI con el CI LTC6802-2 mediante los pines D10, D11, D12, D13,

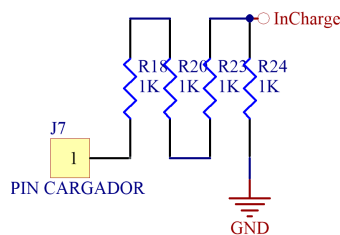


Figura 5.12: Circuito esquemático para el estado del cargador  
Fuente: Autores

la lectura de los sensores de corriente, mediante los pines analógicos A4 y A5, y el estado del cargador, mediante el pin analógico A0. Los pines digitales D2 hasta D9 para el indicador sonoro e indicadores visuales.

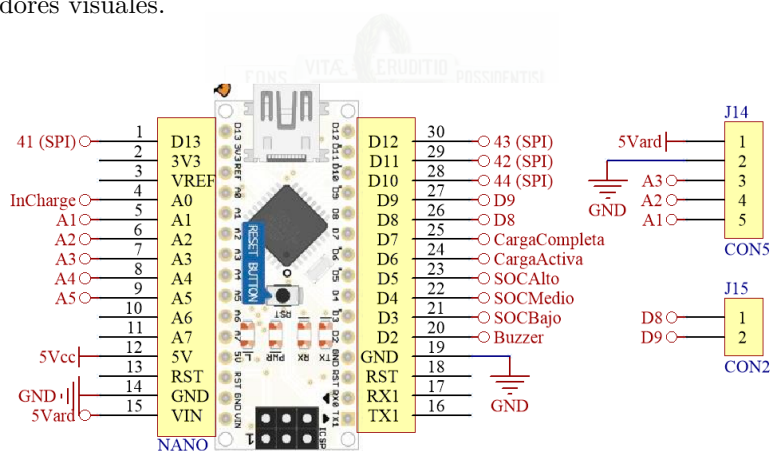


Figura 5.13: Circuito esquemático para el microcontrolador  
Fuente: Autores

Adicionalmente se tiene disponible los pines analógicos A1, A2, A3 y los pines digitales D8 y D9 mediante conectores tipo peineta para la adición de sensores ó indicadores en futuros trabajos.

Como alimentación para este sistema se utiliza un conversor [DC-DC](#) de 5 V a 1 A, el cual puede ser encendido mediante un switch, evitando así que el consumo de energía cuando el sistema no se encuentre en uso y por ende evitando que el banco de baterías sufra una descarga profunda.

#### 5.2.1.2. Sistema de alimentación

Este sistema está conformado por las salidas de alimentación para los drivers de los motores y los conversores [DC-DC](#) para la electrónica asociada al exoesqueleto.

La alimentación de los drivers se lo realiza de manera directa, debido a que estos funcionan con voltajes en el rango de 4 V a 36 V.

Para la alimentación de la electrónica asociada al exoesqueleto se utilizan 2 convertidores DC-DC por extremidad, descritos en 3.4.1, los cuales entregan 5 V y 3.3 V respectivamente. El circuito asociado a estos convertidores se observa en la Figura 5.14.

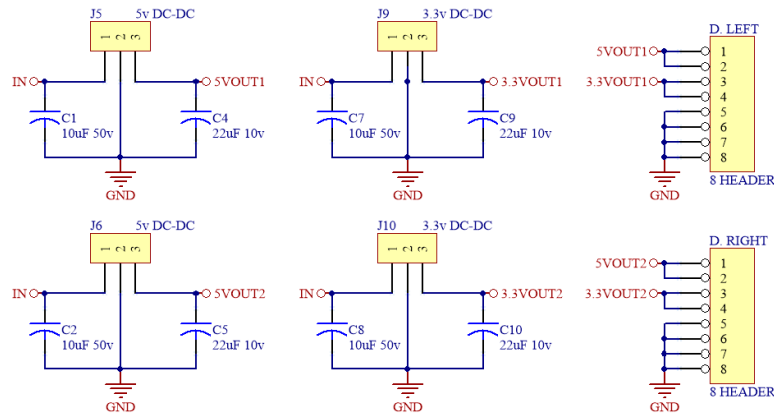


Figura 5.14: Circuito esquemático para las salidas de 5 V y 3.3 V  
Fuente: Autores

Estos voltajes están disponibles mediante los conectores de 8 pines 4x2, la distribución se indica en la Figura 5.15.

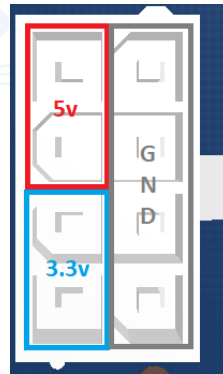


Figura 5.15: Distribución de los voltajes en el conector de 8 pines 4x2.  
Fuente: Autores

Se tiene una salida exclusiva por un conector USB tipo A para la alimentación de la raspberry, mediante el convertidor descrito en 3.4.2, este circuito se indica en la Figura 5.16.



Figura 5.16: Circuito esquemático para la salida de la raspberry  
Fuente: Autores

Adicionalmente se cuenta con 2 salidas auxiliares de 5 V y 3.3 V, su circuito se muestra en la Figura 5.17, estos voltajes están disponibles mediante borneras.

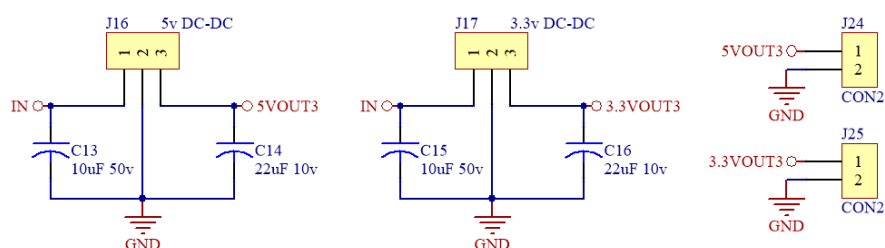


Figura 5.17: Circuito esquemático para las salidas auxiliares de 5 V y 3.3 V  
Fuente: Autores

### 5.2.1.3. Construcción del PCB final

El PCB final consta de 135 mm de ancho por 160 mm de longitud. El mismo está diseñado a doble capa y alberga los circuitos descritos anteriormente, en donde, en la capa superior se ubican todos los componentes que conforman el sistema, mientras que la capa inferior sirve para realizar conexiones de los diferentes circuitos. En la Figura 5.18 se observa ambas caras de este PCB.

### 5.2.1.4. Contenedor de PCB

Se diseñó un contenedor para el PCB con el propósito de evitar daños al momento de la manipulación y transporte, además de acoplar este al contenedor del banco de baterías.

El contenedor está diseñado para albergar el switch de encendido para el sistema de alimentación del exoesqueleto, así como tiene disponibles las salidas y entradas del PCB. El contenedor del PCB está diseñado construido en MDF de 3 mm, acorde a las dimensiones del contenedor del banco de baterías, permitiendo un acople entre ambos mediante pernos de métrica M4,

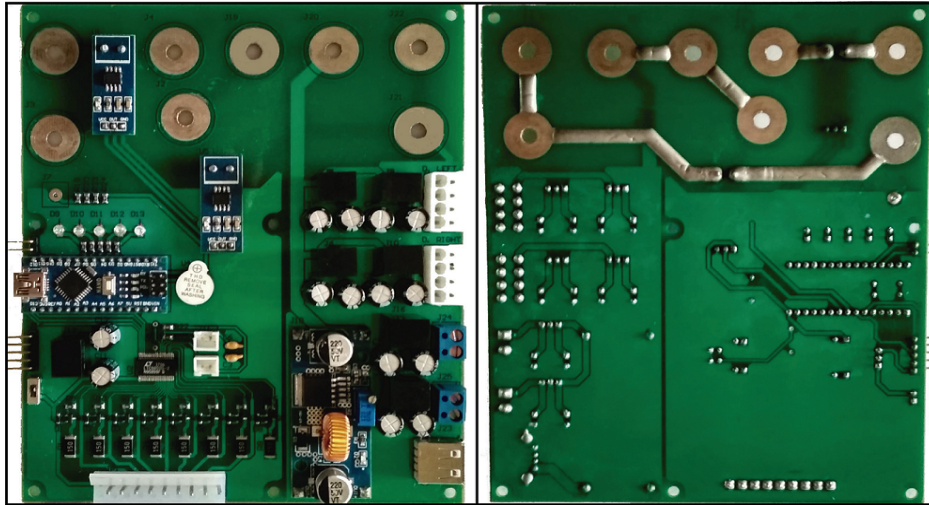


Figura 5.18: Izquierda.- Cara superior del PCB final. Derecha.- Cara inferior del PCB final.  
Fuente: Autores

otorgando así movilidad conjunta del banco de baterías junto con el Sistema de Gestión de Energía. En la Figura 5.19 se observa el contenedor mencionado y el acoplamiento descrito anteriormente.

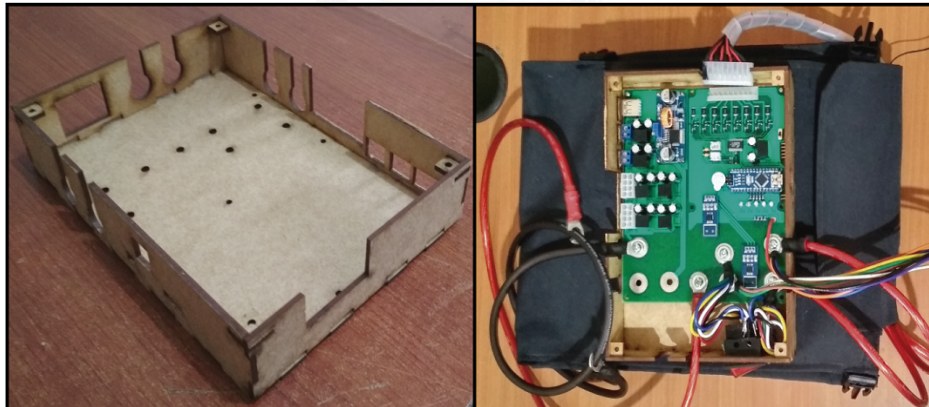


Figura 5.19: Izquierda.- Contenedor del PCB. Derecha.- Contenedor del PCB junto con el contenedor del banco de baterías

Fuente: Autores

### 5.2.2. Mochila Contenedora

Para permitir una mejor movilidad del sistema de gestión de energía se adaptó una mochila convencional que sirva a modo de transporte para todo el sistema. Los aspectos importantes



para el diseño de esta mochila son:

- Movilizar el sistema sin la necesidad tener una parte del mismo en forma estacionaria.
- Evitar daños al sistema por manipulación o movilización.
- Brindar al usuario libre movilidad sin preocuparse por el equipo que lleva.
- Distribuir el peso de forma equitativa a lo largo del tren superior para que la persona no sufra lesiones al llevar dicho sistema.

La mochila seleccionada consta de 2 compartimientos:

- Un compartimiento principal con una capacidad de  $10232\text{ cm}^3$ .
- Un compartimiento secundario con una capacidad de  $1350\text{ cm}^3$ .

El compartimiento principal se adecuó, mediante hebillas de plástico, para que albergue al contenedor de baterías junto con el sistema de gestión de energía y lo mantenga fijo, evitando daños al momento de transportarse con el mismo. Esto se observa en la Figura 5.20.



Figura 5.20: Izquierda.- Compartimiento principal con las hebillas de plástico. Derecha.- Contenedor asegurado al compartimiento principal

Fuente: Autores

Para las salidas de alimentación de los drivers y la electrónica del exoesqueleto se utilizan prensa-estopas PG-21, con el propósito de evitar daños por tirones que se puedan producir en estas salidas al momento de utilizar al sistema junto con el exoesqueleto. En la Figura 5.21 se observa las salidas adaptadas a la mochila contenedora.



Figura 5.21: Prensa-estopas en la mochila. Arriba.- Ubicación de los prensa-estopas. Abajo.- Prensa-estopas con salidas para drivers y electrónica

Fuente: Autores

Todo el sistema tiene un peso de 16 lbs, por lo cual es necesario distribuir el mismo en el tren superior de la persona, por lo tanto, se agregó correas junto con hebillas en los tirantes de la mochila a la altura del pecho y abdomen, evitando así que todo el peso recaiga sobre los hombros, además de agregar seguridad al sistema cuando existan movimientos bruscos al momento de transportar el sistema. En la Figura 5.22 se puede observar la modificación antes mencionada.

### 5.2.3. Algoritmo del microcontrolador

Para el diseño Final del algoritmo de comunicación y monitoreo de datos se partió en un principio con la creación de dos prototipos presentados en el Anexo D, estos ayudaron a verificar las diferentes variables, ecuaciones, valores de entrada y salida, velocidades de comunicación, etc. Tomando como base estos prototipos, y a través de la implementación de los circuitos vistos en la sección 5.2.1, la versión final del algoritmo del microcontrolador Arduino Nano fue diseñada para realizar los siguientes procedimientos:

1. Inicializa las variables de: los registros de la Tabla 4.3, ecuaciones de lectura de temperatura, estado de carga y calibración de los sensores de corriente .
2. Configura los parámetros del microcontrolador, como son: velocidad de comunicación



Figura 5.22: Hebillas y correas adaptadas a la mochila. Izquierda.- Hebillas y correas adaptadas a los tirantes. Derecha.- Mochila transportada por una persona

Fuente: Autores

serial [RS232](#), velocidad de reloj para la comunicación [SPI](#), pins de entrada y salida y sus correspondientes estados iniciales.

3. Entra en el bucle de ejecución en donde activa las funciones de: escritura de registros de configuración del LTC6802-2, lectura de voltaje de celdas, lectura de temperatura por parte de los termistores, activación de leds de estado de carga, función de carga de celdas y medición de corriente.

A continuación se explican las funciones que se encuentran dentro del algoritmo. Los respectivos algoritmos se incluyen en el Anexo [E](#).

#### A. Función de Escritura de Registros de Configuración

Esta función se encarga de enviar los registros indicados en la Tabla [4.3](#), los cuales determinan las diferentes configuraciones del LTC6802-2. Estos registros se envían usando la comunicación [SPI](#). Esta función se muestra en el Anexo [E.1](#)

#### B. Función de Lectura de Voltajes

Mediante esta función se le ordena al [CI](#) LTC6802-2 que envíe los registros que contienen los datos de medición de voltaje de las celdas. El microcontrolador recopila estos datos y los transforma a un valor de voltaje real, ya que el [CI](#) entrega dos registros de 8 bits por cada celda, de los cuales 12 bits de los 16 presentes por los dos registros, representan el voltaje de la celda  $C_i$  y los otros 4 pertenecen a la celda  $C_{i+1}$ .

La diferencia con respecto a los algoritmos de los prototipos radica en que a esta función se le agregó la llamada a las funciones de estado de carga y a la función de balanceo de celdas.

La Función de Lectura de Voltajes se presenta en el Anexo [E.2](#).

### C. Función de Lectura de Temperatura

Al igual que la función anterior, esta se encarga de solicitar al LTC6802-2 registros que contienen mediciones, en este caso datos de temperatura medidos por los termistores. La información obtenida consiste en 2 registros de 8 bits por termistor, de los cuales 12 bits contienen la temperatura del termistor 1 y los otros 4 pertenecen al termistor 2.

Esta función se presenta en el Anexo [E.3](#)., cabe recalcar que no existe diferencia respecto a la función descrita en el prototipo del Anexo [D](#).

### D. Función de Balanceo de Celdas

Esta función lleva a cabo el balanceo de celdas. Para ello toma los datos de voltajes dados por el LTC6802-2 y realiza los pasos:

1. Encuentra la celda con menor voltaje.
2. Determina si la Celda<sub>i</sub> debe ser o no balanceada basándose en: si la diferencia entre esta celda y la de menor voltaje es mayor a 0.1 V, si lo es se realiza el balanceo.
3. En el caso de que determine que es necesario realizar el balanceo, este se ejecuta hasta que la diferencia entre la Celda<sub>i</sub> y la celda de menor voltaje no sea mayor a 0.01 V.
4. El balanceo de cada celda se determina con el registro **CFGR1**, en el cual cada uno de sus bits representan a una celda, por lo que si una celda debe ser balanceada su correspondiente bit pasa de 0 a 1, caso contrario, es decir la diferencia de voltajes es menor a 0.01 V, el bit cambia de 1 a 0.
5. El balanceo se detiene de forma automática cuando todos los bits del registro **CFGR1** son 0, o dicho de otra forma, este tiene el valor binario 00000000.

Con los pasos anteriores se automatiza el balanceo, dándose siempre que exista una diferencia igual o mayor a 0.1 V entre las celdas y se realizará hasta que esta desigualdad no supere los 0.01 V.

Esta Función se puede observar en el Anexo [E.4](#).

### E. Función de Estado de Carga

Con esta función, presentada en el Anexo [E.5](#) se determina el estado de la carga, es decir, si se encuentra con alta, media o baja carga, estado que se determina en función del valor del voltaje del banco: 27 V o más representa una carga alta, entre 27 y 25 V, se tiene una carga media, y menor a 25 V se encuentra con una carga baja. Además esta función se encarga de activar los leds y el buzzer, los cuales representan una alarma visual y sonora del estado de carga.

#### **F. Función de Carga de Celdas**

Se diseñó esta función con el objetivo de detectar si se encuentra conectado o no el cargador al sistema, lo cual se lleva acabo a través de la lectura del pin de control del cargador.

Leyendo el pin de control del cargador esta función puede determinar: si el banco se encuentra cargando, cargado o si el cargador ha sido conectado al [PCB](#) principal pero no se han conectado las celdas. Además permite dos tipos de avisos, un aviso visual a través de 2 leds: rojo (blanco cargado) y verde (banco cargándose), y un aviso sonoro : un buzzer que emite un pitido de forma constante cuando se han cargado las celdas. La función se presentan en el Anexo [E.6](#).

#### **G. Función de Medición de Corriente**

Esta función, presentada en el Anexo [E.7](#), captura la señal analógica de voltaje proveniente del Sensor de Corriente ACS712 y, usando la ecuación [B.8](#) del Anexo [B](#) se la convierte en su correspondiente valor de corriente. Para otorgar el dato final, la función toma un determinado número de muestras y luego las promedia, entregando como resultado la corriente que consume el exoesqueleto o la corriente de carga de las celdas, dependiendo de cuál de los 2 sensores se trate.

Los dos sensores que maneja esta función se resumen en la Tabla [5.2](#). Es necesario indicar que solo uno de los sensores está activo a la vez, ya que el sistema no está diseñado para ser usado mientras se cargan las celdas.

Tabla 5.2: Características de los sensores de corriente

Sensor	Sensibilidad	Offset	Puerto analógico de entrada	Activación	Fuente:
Consumo exoesqueleto	0,0134	0,572	A5	Cargador desconectado	
Carga de Celdas	0,0138	0,560	A0	Cargador conectado	

Autores

## 5.3. Resultados

En esta última sección se presentan los resultados obtenidos con el [PCB](#) final, a medida de verificación del funcionamiento correcto los circuitos, algoritmos y demás dispositivos. Las gráficas de los resultados pueden ser observadas con una mejor resolución en el [Anexo F](#).

### 5.3.1. Prueba de Comunicación

Como primer punto se comprobó la comunicación entre el microcontrolador y el LTC6802-2. La [Figura 5.23](#) muestra en ejecución el programa cargado en el microcontrolador, aquí se observan los voltajes de las 8 celdas, el voltaje total del banco, el estado de carga (carga alta), el balanceo de las celdas 1, 2, 4, 5, balanceándose al valor de la celda 7, la corriente que se encuentra consumiendo, 0.5 A, la temperatura captada por los 2 termistores e indica que no se encuentra conectado el cargador.

### 5.3.2. Balanceo de Celdas

Una vez verificada la comunicación se procedió a realizar el balanceo de las celdas. Para ello se comenzó por descargar las celdas hasta los voltajes mostrados en la [Tabla 5.3](#), luego se implementó el Sistema de Gestión de Energía para balancear las celdas y capturar los respectivos datos. Cabe indicar que para esta prueba el balanceo se realizó usando una diferencia mínima de 0.01 V entre la celda de menor voltaje y las demás celdas.

Tabla 5.3: Voltajes de las Celdas antes del Balanceo

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.56	3.569	3.569	3.572	3.58	3.569	3.55	3.54

Fuente: Autores



```
#####
EJECUCION DEL PROGRAMA
#####
=====
VOLTAJE DE CELDAS
=====
Celda 1; 3.52 V
Celda 2; 3.50 V
Celda 3; 3.48 V
Celda 4; 3.50 V
Celda 5; 3.51 V
Celda 6; 3.49 V
Celda 7; 3.48 V
Celda 8; 3.49 V
Banco: 27.97 V
Carga: Alta
=====
BALANCEO DE CELDAS
=====
La celda minima es : Celda 7, con 3.48 V
La Celda 1 se encuentra balanceando
La Celda 2 se encuentra balanceando
La Celda 4 se encuentra balanceando
La Celda 5 se encuentra balanceando
=====
CORRIENTE
=====
Corriente de consumo : 0.5 A
=====
TEMPERATURA DE CELDAS
=====
Temperatura 1: 22 °C
Temperatura 2: 21 °C
=====
CARGA DE CELDAS
=====
Carga: Cargador no conectado
```

Figura 5.23: Ejecución del Algoritmo Final

Fuente: Autores

En la Figura 5.24 se muestra el resultado de esta prueba, se monitoreo el sistema por alrededor de 8 horas y 18 minutos, un total de 498 minutos. Se observa que todas las celdas se balancearon alrededor del minuto 438. Las celdas se equilibraron a la Celda 8, ya que esta es la de menor voltaje, y el balanceo se realizó hasta que le diferencia no superó el valor de 0.01 V. En la Tabla 5.4 se presentan los valores de voltaje de las celdas luego del balanceo, aquí se puede apreciar como las estas se balancearon hasta llegar a los 3.55 V, mientras que la Celda 8 permaneció en 3.54 V.

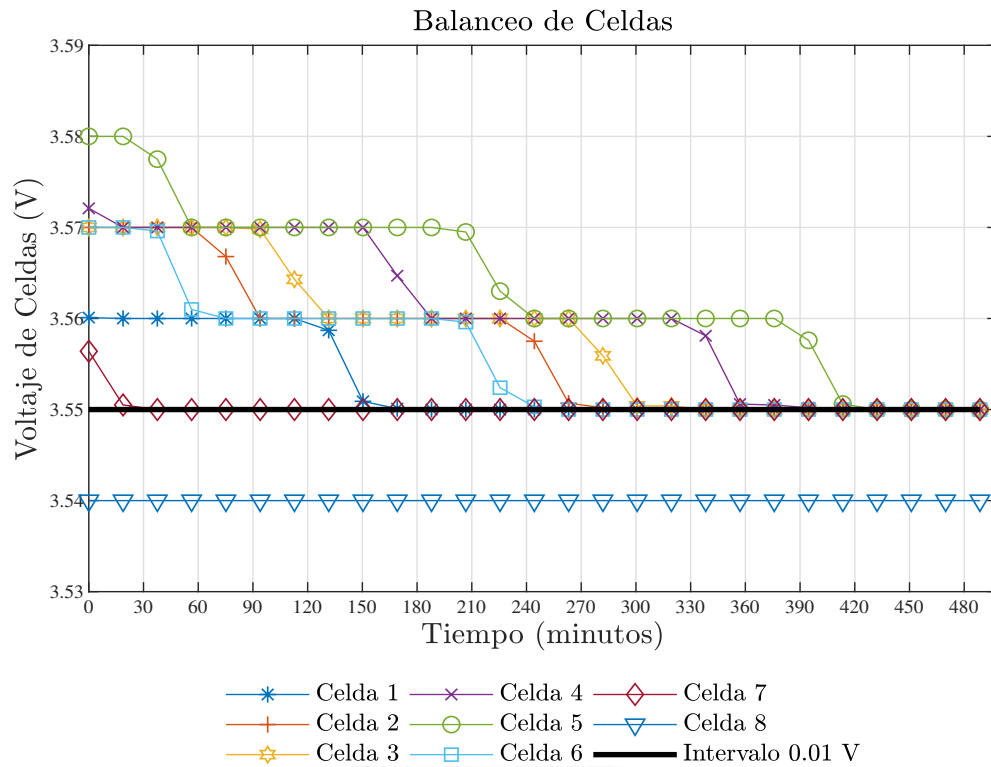


Figura 5.24: Resultado del Balanceo de Celdas

Fuente: Autores

Tabla 5.4: Voltajes de las Celdas luego del Balanceo

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.54

Fuente: Autores

### 5.3.3. Primera Prueba con una Carga Resistiva

Con el objetivo de obtener la eficiencia del Sistema de Gestión de Energía y del Cargador de Baterías, se realizó una prueba conectando una carga resistiva de  $3.3 \Omega$  al sistema. Esta resistencia fue escogida al poder soportar hasta 13.5 A.

Las pruebas realizadas se llevaron a cabo empleando dos equipos de medición: El Sistema de Gestión con sus respectivos sensores y la herramienta HIOKI PW3337, el cual es un medidor de potencia de 3 canales de alta precisión, entregando datos como: voltaje, corriente, potencia energía, etc. [34]



Como primer punto se realizó la descarga del banco de baterías usando la resistencia de  $3.3 \Omega$ , partiendo de 28.3 V hasta llegar a 23.5 V, la gráfica del voltaje total del banco se presenta en la Figura 5.25. Aquí se observa como las medidas tomadas por el Sistema de Gestión (en azul) son muy aproximadas a las obtenidas por el medidor HIOKI PW3337.

La prueba no duró mas allá de 32 minutos, pues el banco se aproximaba a su voltaje mínimo de 22.48 V, por lo que se decidió suspender la descarga, luego de esto, y al estar desconectada la resistencia, el voltaje del banco comenzó a incrementar hasta los 24.35 V.

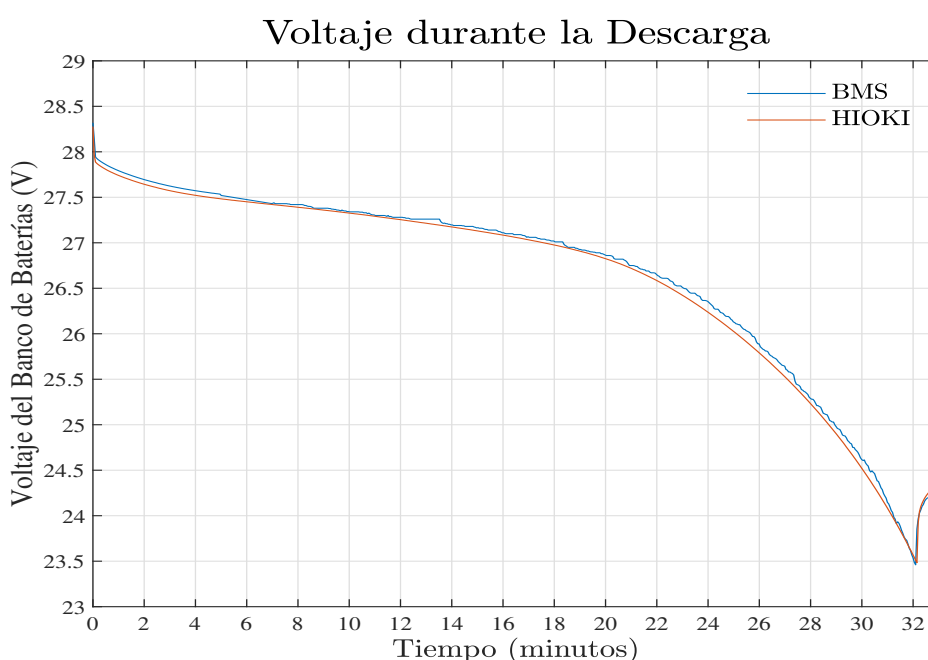


Figura 5.25: Voltaje del Banco durante la Descarga

Fuente: Autores

En la Figura 5.26 se presentan los voltajes de cada celda. Se observa como estas no sufren de un desbalance excesivo, por lo que el balanceo automático no se activa, es decir no existe una diferencia mayor a 0.1 V entre las celdas, esto se debe en gran parte al hecho de que las baterías no han sufrido de cargas ni descargas más allá de su zona de voltaje seguro (entre 2.81 V y 4.15 V por celda).

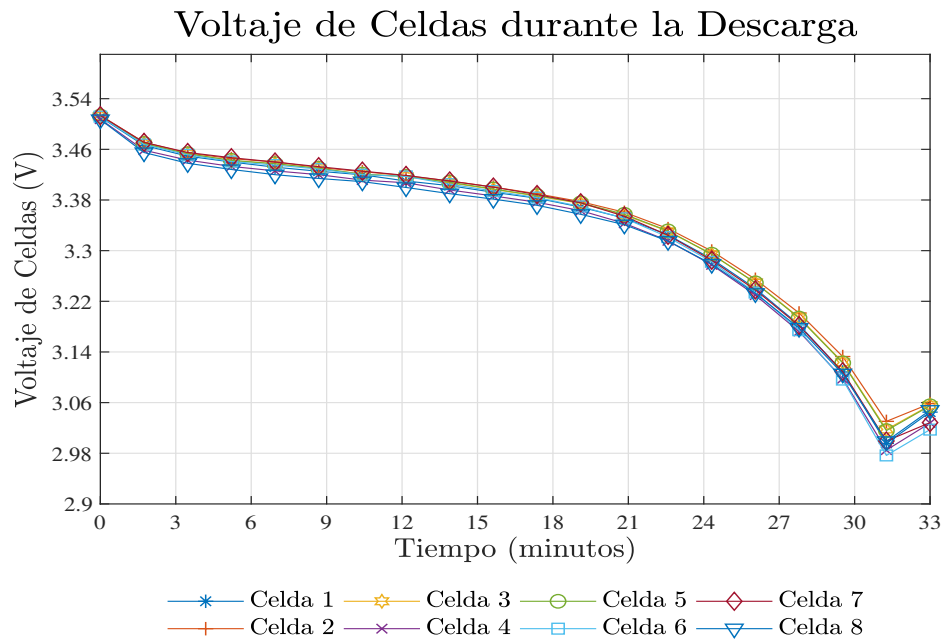


Figura 5.26: Voltaje de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

Con esta prueba se verificó el correcto funcionamiento de LTC6802-2 al realizar mediciones de voltajes y , además, mientras todas las celdas reciban la carga resistiva, estas no sufrirán un desbalanceo.

La Figura 5.27 muestra la curva de corriente durante esta prueba. En azul se presentan las medidas tomadas por el equipo HIOKI PW3337 y en naranja los datos obtenidos por el Sensor ACS712. La descarga inicia con una corriente de aproximadamente 8.9 A y termina en 7.57 A. Al igual que con los resultados de la medición de voltaje, estos datos dados por el Sensor ACS712 se aproximan muchísimo a los del HIOKI PW3337, por lo que el que el sistema es adecuado para realizar mediciones de corriente.

La curva de energía entregada por el banco de baterías, obtenida mediante el medidor HIOKI, se presenta en la Figura 5.28. En esta Figura se puede notar que en los 32 minutos que duró la descarga se entregó un máximo de 122.43 Wh.

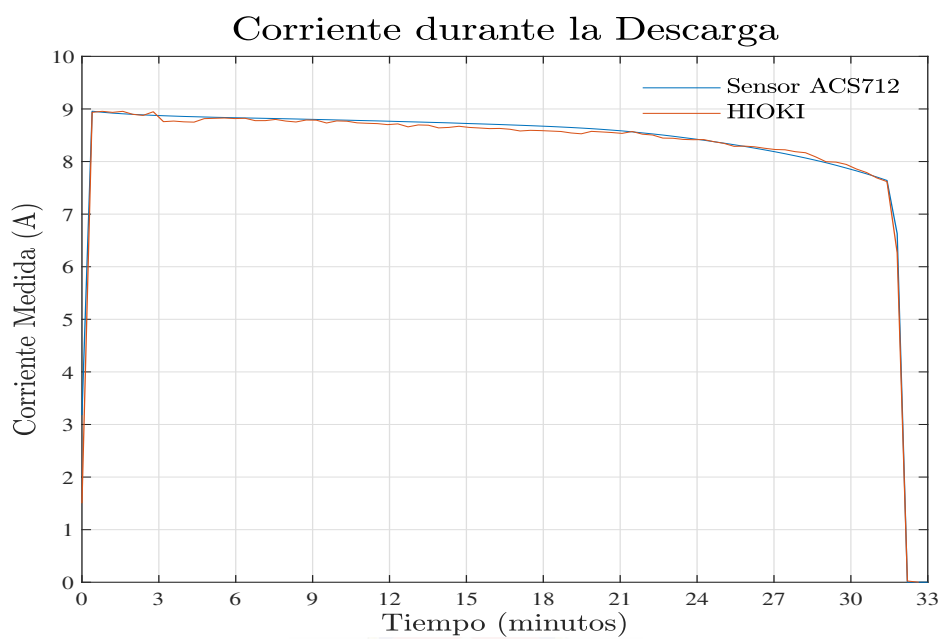


Figura 5.27: Corriente del Banco durante la Descarga

Fuente: Autores

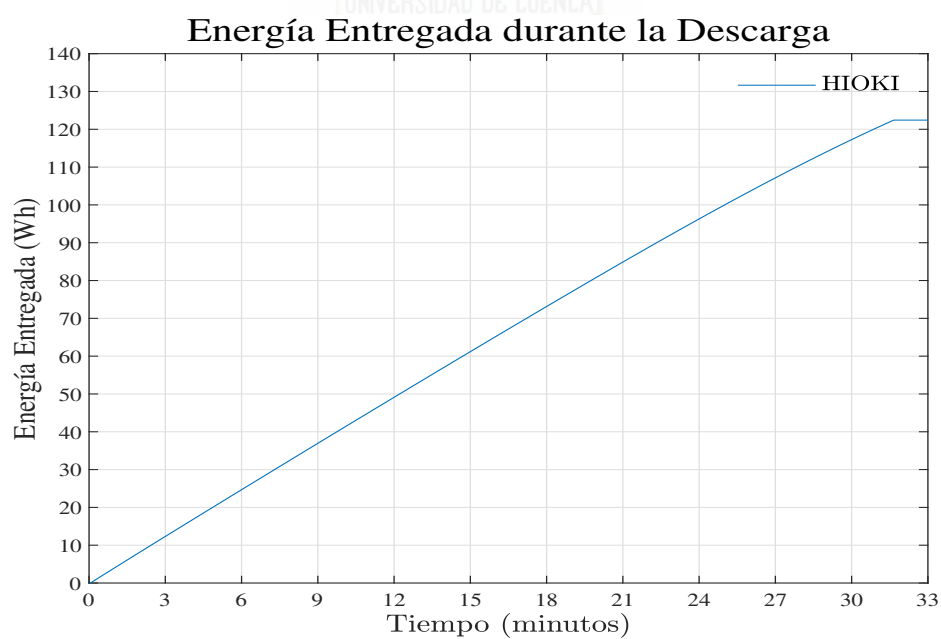


Figura 5.28: Energía Entregada por el banco de baterías

Fuente: Autores

En cuanto a la descarga de las celdas, se tiene como última medición a la temperatura del banco. Estos datos se obtuvieron gracias a los dos termistores colocados en el centro y principio del banco de baterías. Los resultados se muestran en la Figura 5.29, en donde se aprecia que la temperatura aumenta 2 grados con respecto a la temperatura inicial, lo que significa que el banco no corre peligro de sobrecalentamiento y que se encuentra dentro del rango de operación.

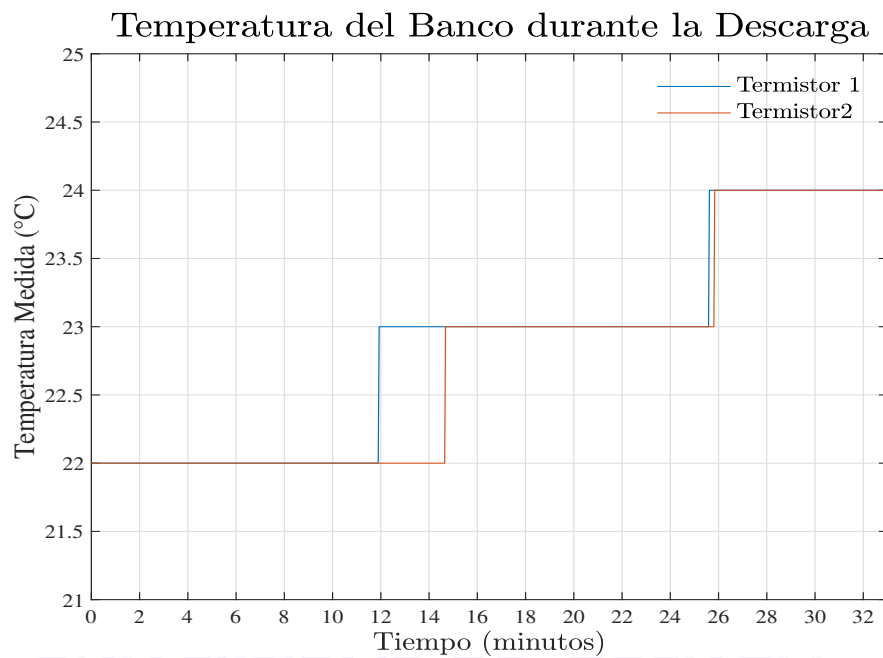


Figura 5.29: Temperatura del banco de baterías durante la Descarga

Fuente: Autores

Para corroborar la eficiencia del sistema, en términos de energía entregada vs energía recibida, se realizó la carga de las celdas empleando el cargador PB-360P-24. De forma similar, en la descarga se tomaron medidas de: Voltaje del Banco, Figura 5.30 , Voltaje de las Celdas 5.31, Corriente de Carga, Figura 5.32, y Energía entregada, Figura 5.33, en este caso, por el cargador.

Los valores de las gráficas fueron adquiridos de la misma forma que en el proceso de descarga, con los sensores del Sistema de Gestión y con el medidor HIOKI PW3337.

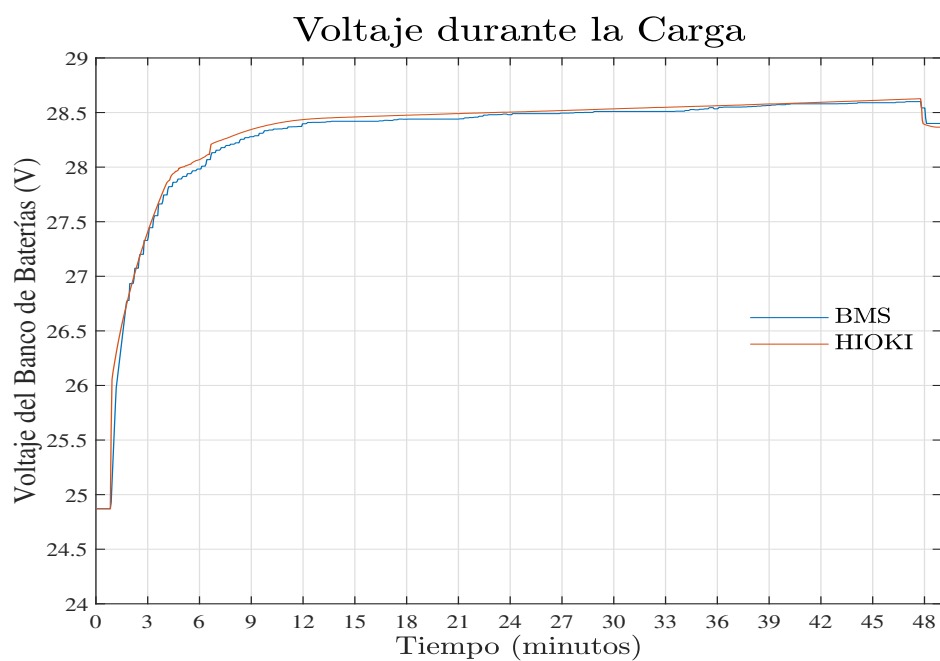


Figura 5.30: Voltaje durante la Carga

Fuente: Autores

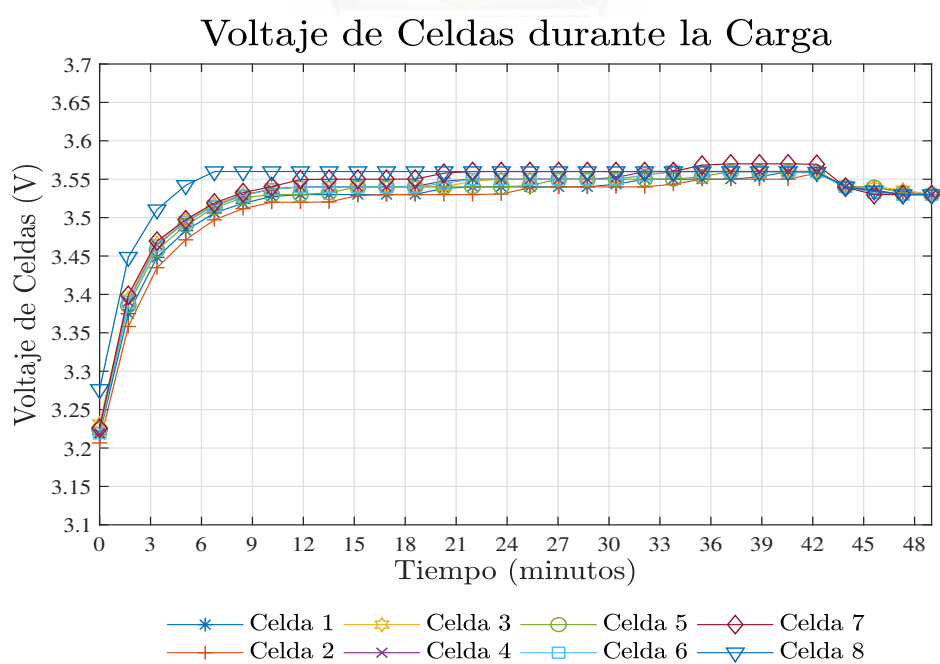


Figura 5.31: Voltaje de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

La Figura 5.32 representa la corriente entregada por el cargador durante la carga, la cual es similar a la curva dada por la data técnica del cargador mostrada en la Figura 4.9 de la sección 4.3.

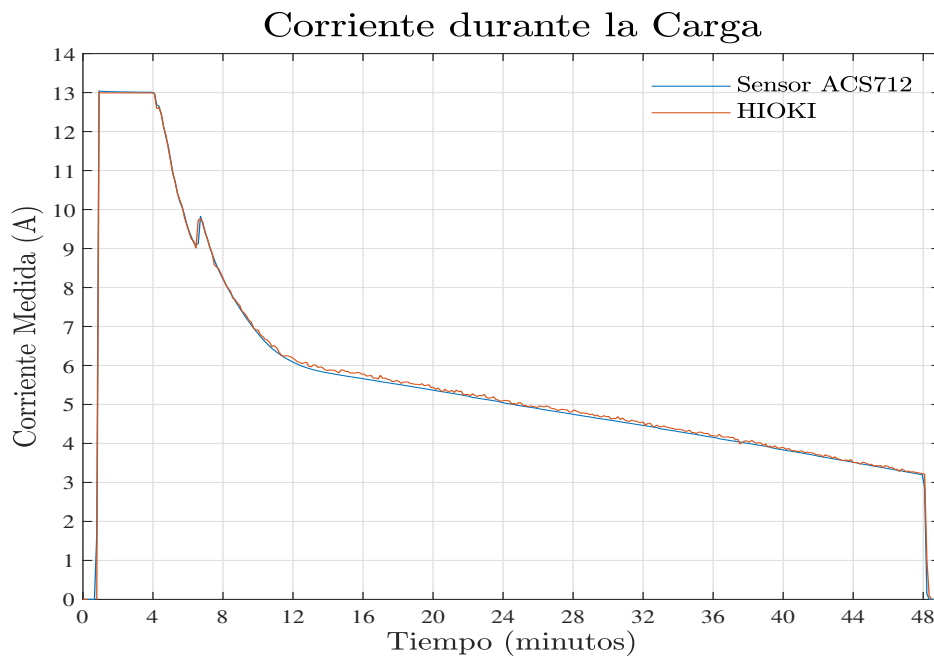


Figura 5.32: Corriente del Banco durante la Carga

Fuente: Autores

Para el caso de la energía entregada durante la carga, en la Figura 5.33, se observa que se llegó a un máximo de 131.24 Wh lo cual indica el porqué de los 122.43 Wh entregados durante la descarga, ya que la energía que se entrega no puede ser mayor a la que se recibe. Con estos valores podemos calcular la eficiencia del banco de baterías.

$$\begin{aligned} Eficiencia &= \frac{Wh_{Entregados}}{Wh_{Recibidos}} \\ Eficiencia &= \frac{122,43}{131,24} \\ Eficiencia &= 0,9328 \\ Eficiencia &= 93,28\% \end{aligned} \tag{5.1}$$

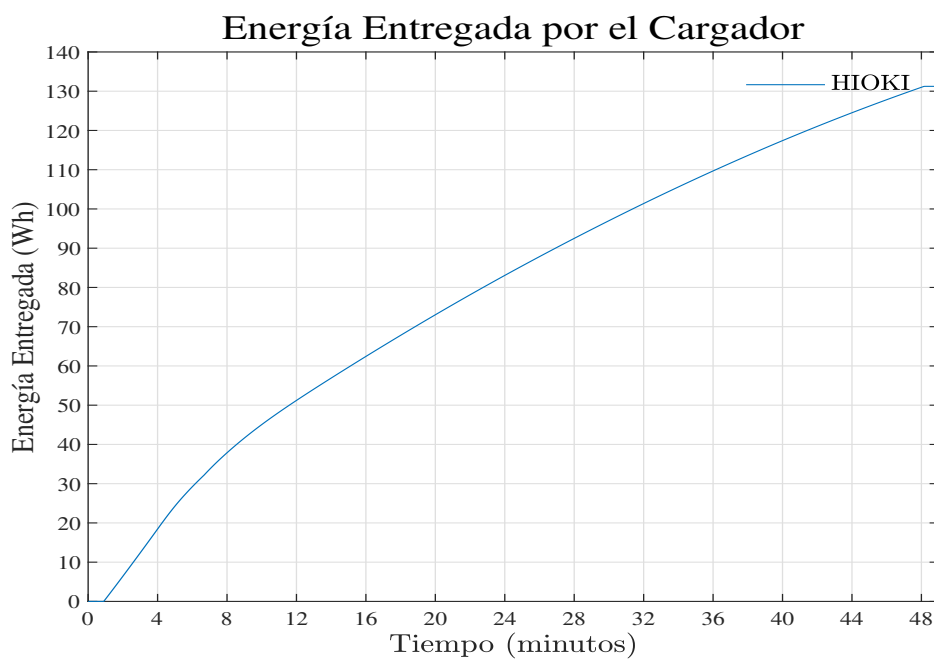


Figura 5.33: Energía Entregada por el Cargador

Fuente: Autores

Finalmente, la temperatura medida por los termistores durante la carga revela, según la Figura 5.34, que el banco sufre el aumento de un grado en su parte interna (Termistor 1) obteniéndose una temperatura final de 22 °C, por lo que no hay riesgo de un mal funcionamiento de las celdas por parte de un sobrecalentamiento.

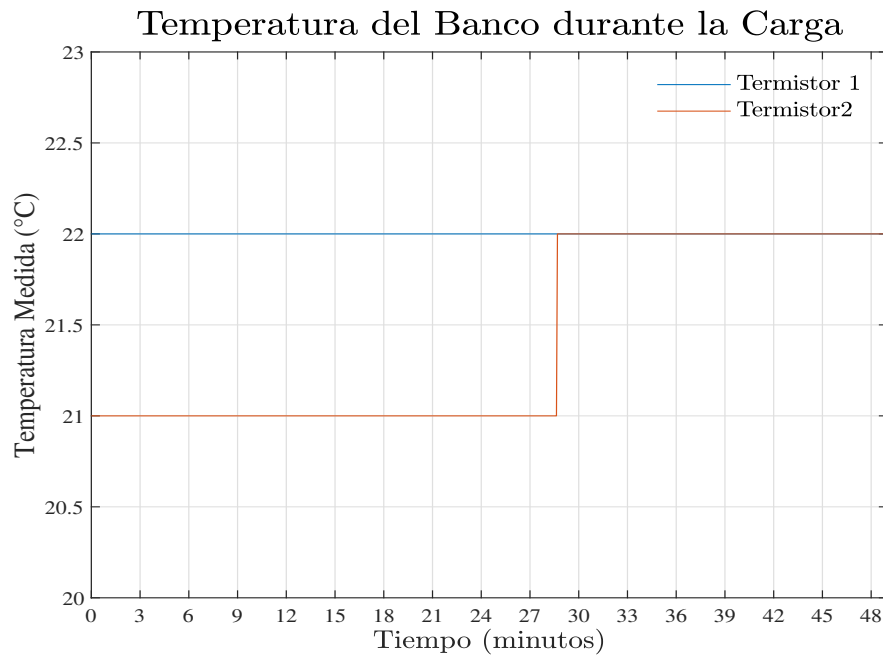


Figura 5.34: Temperatura del banco de baterías durante la Carga

Fuente: Autores

#### 5.3.4. Segunda Prueba con una Carga Resistiva

En vista a los resultados obtenidos con la primera prueba, se decidió realizar una segunda toma de datos, esta vez con un valor diferente de voltaje del banco de baterías.

En primer lugar se comenzó realizando la carga de las celdas, partiendo de un banco con un voltaje de 26.315 V, se logró alcanzar un voltaje final de 28.695 V. La gráfica del Voltaje del Banco, Voltaje de Celdas, Corriente de Carga, Energía entregada por el Cargador y Temperatura del Banco se muestran en las figuras 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, respectivamente.

En este caso la energía entregada por el cargador fue de 168.01 Wh, ya que el tiempo de carga duró aproximadamente 60 minutos.



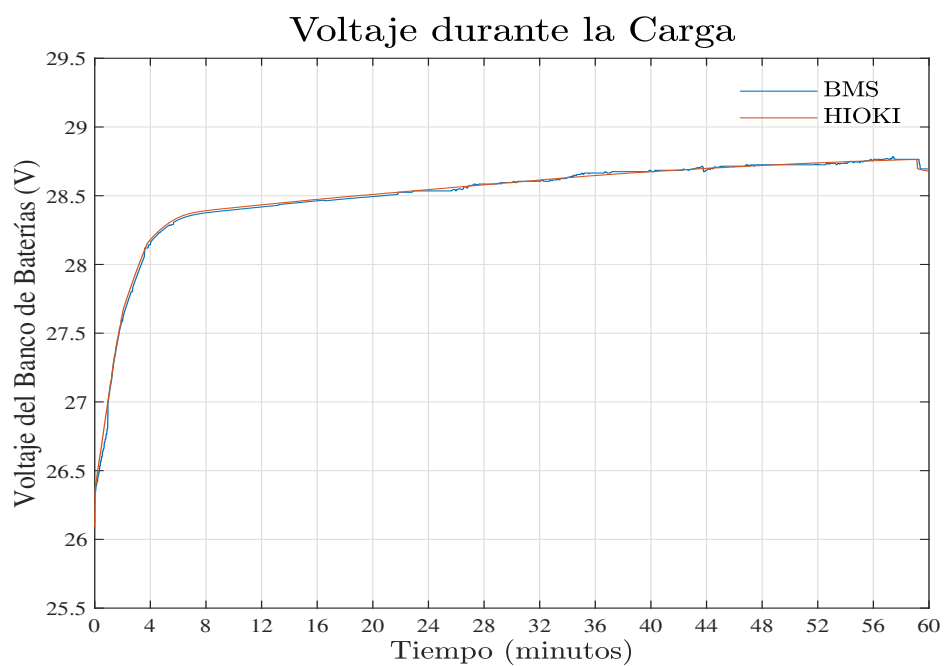


Figura 5.35: Voltaje Durante la Carga

Fuente: Autores

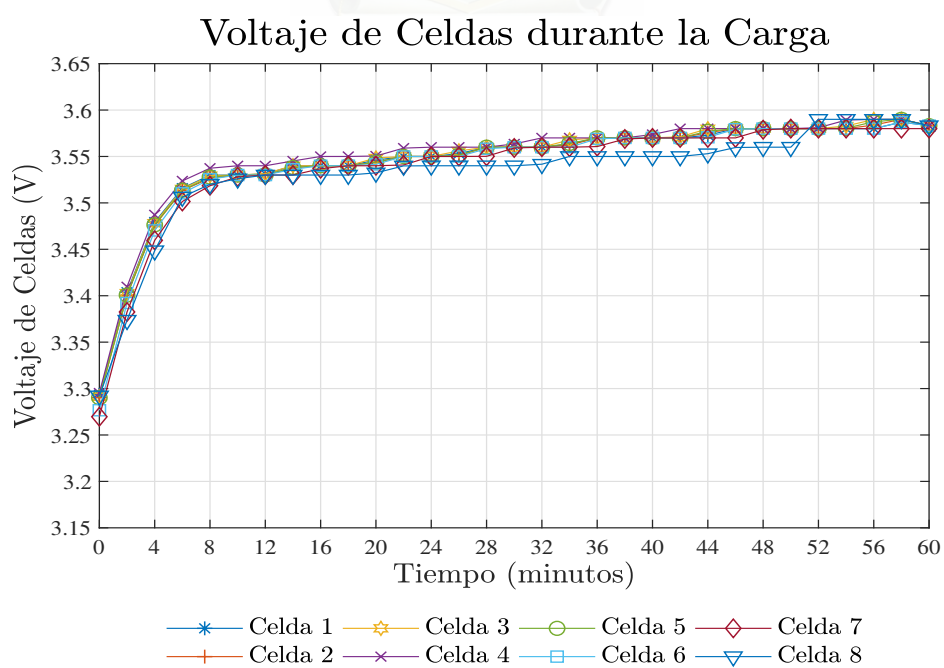


Figura 5.36: Voltaje de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

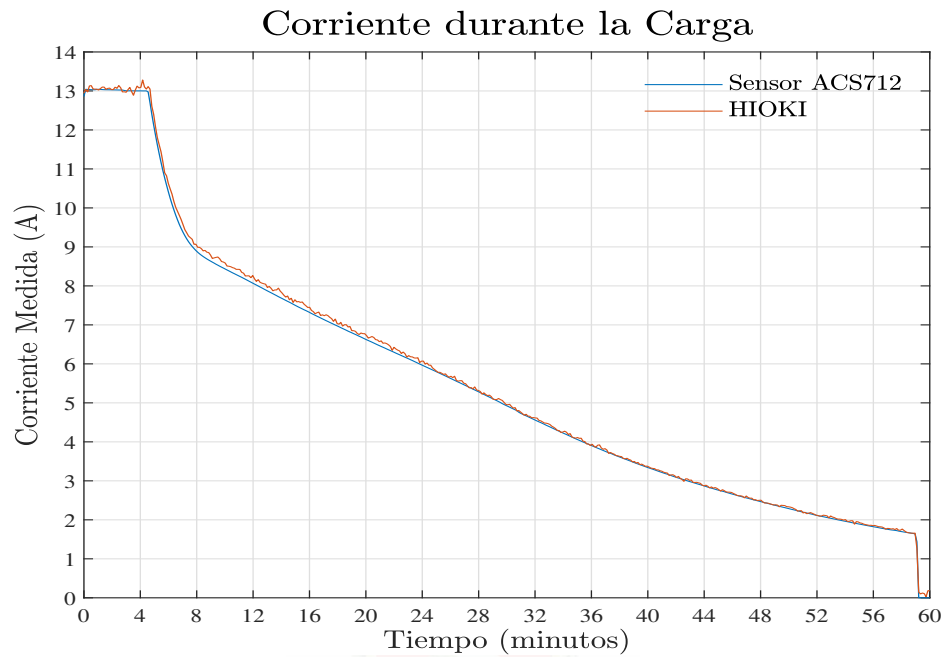


Figura 5.37: Corriente del Banco durante la Carga

Fuente: Autores

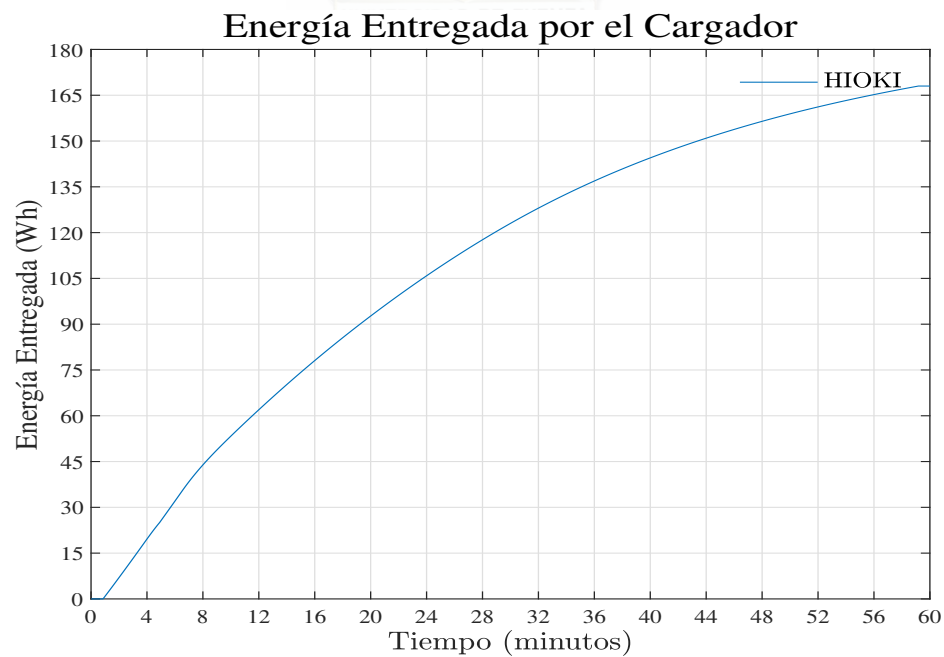


Figura 5.38: Energía Entregada por el Cargador

Fuente: Autores

Al igual que la primera carga, en esta la temperatura del banco se incrementó en 1 °C, llegando a una temperatura final de 22 °C, tal como se aprecia en la Figura 5.39.

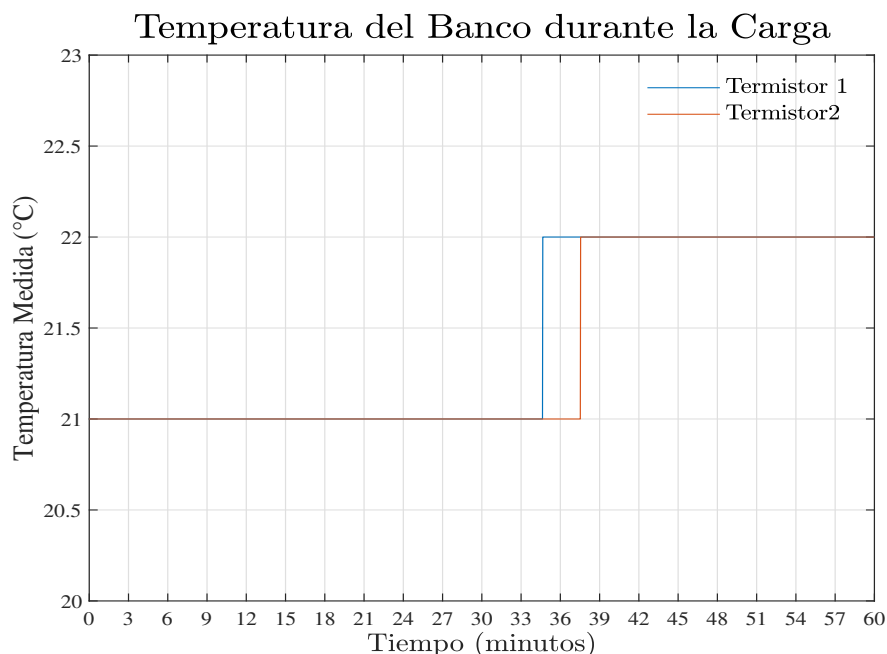


Figura 5.39: Temperatura del banco de baterías durante la Carga

Fuente: Autores

Con el banco cargado se procedió a realizar una segunda descarga, la cual duró aproximadamente 42 minutos. Los resultados de Voltaje del Banco, Voltaje de Celdas, Corriente de Carga, Energía durante la Carga y Temperatura del Banco se muestran en las figuras 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, respectivamente.

Con esta prueba y gracias a la nueva carga y un mayor tiempo de descarga que el de la prueba anterior, el banco entregó una energía de 152.55 Wh, la cual es menor a los 168.01 Wh obtenidos durante la carga. De manera similar se calcula la eficiencia del banco de baterías con estos valores.

$$\begin{aligned}
 Eficiencia &= \frac{Wh_{Entregados}}{Wh_{Recibidos}} \\
 Eficiencia &= \frac{152,55Wh}{168,01Wh} \\
 Eficiencia &= 0,9079 \\
 Eficiencia &= 90,79\%
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

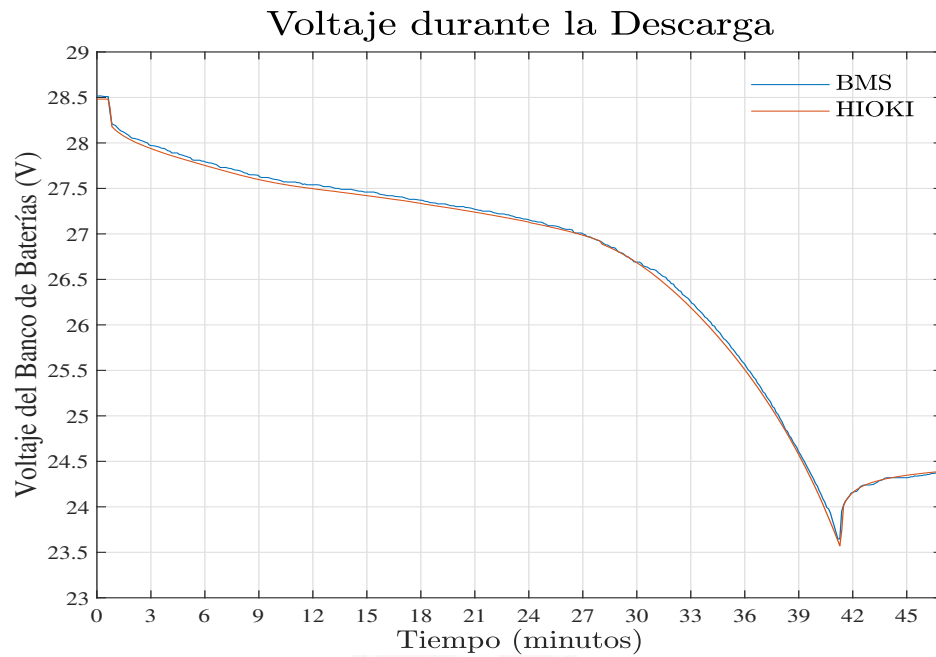


Figura 5.40: Voltaje Durante la Descarga

Fuente: Autores

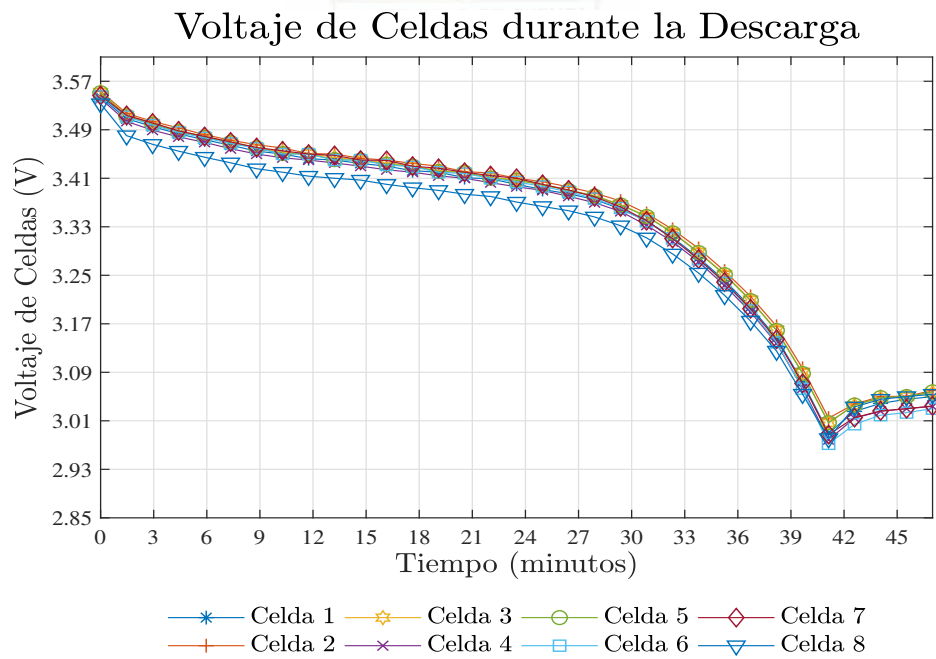


Figura 5.41: Voltaje de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

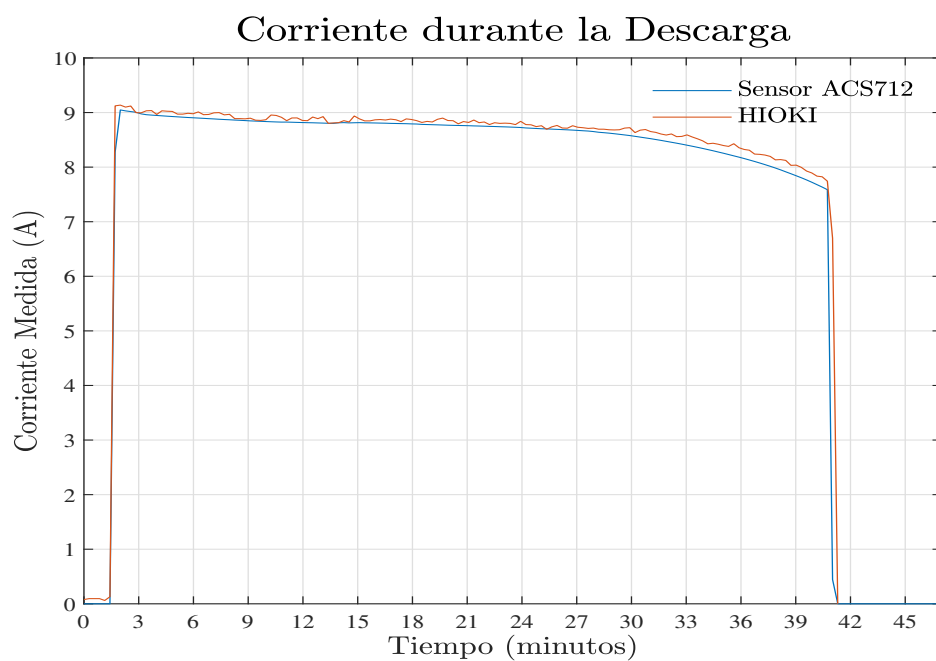


Figura 5.42: Corriente del Banco durante la Descarga

Fuente: Autores

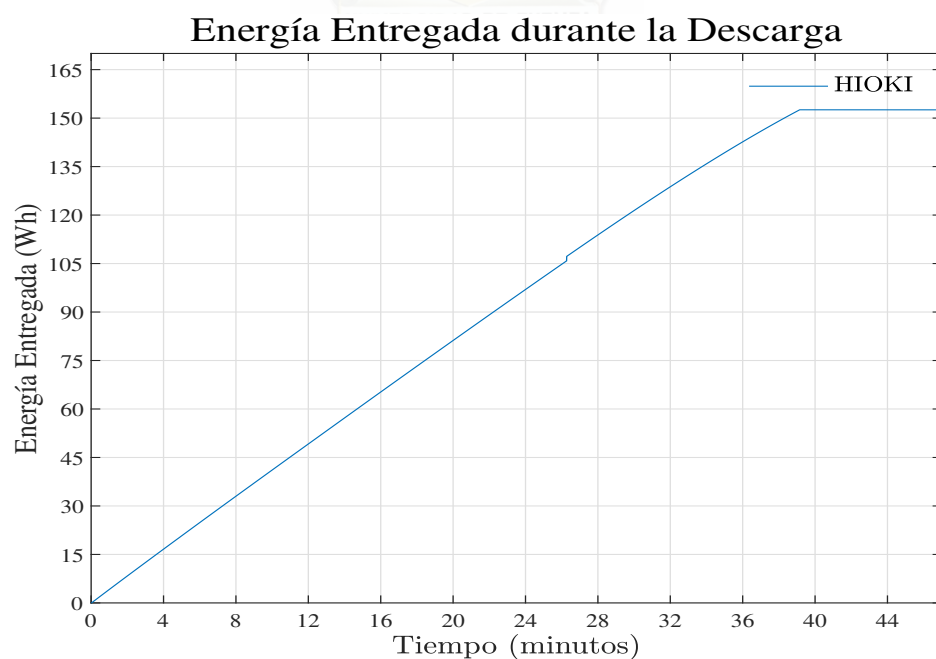


Figura 5.43: Energía Entregada por el banco de baterías

Fuente: Autores

Por último, los datos de temperatura del Banco, Figura 5.44, indican que aún existiendo una mayor transferencia de energía en comparación con la primera prueba, no existe un riesgo de sobrecalentamiento ya que la temperatura final es de 24 °C.

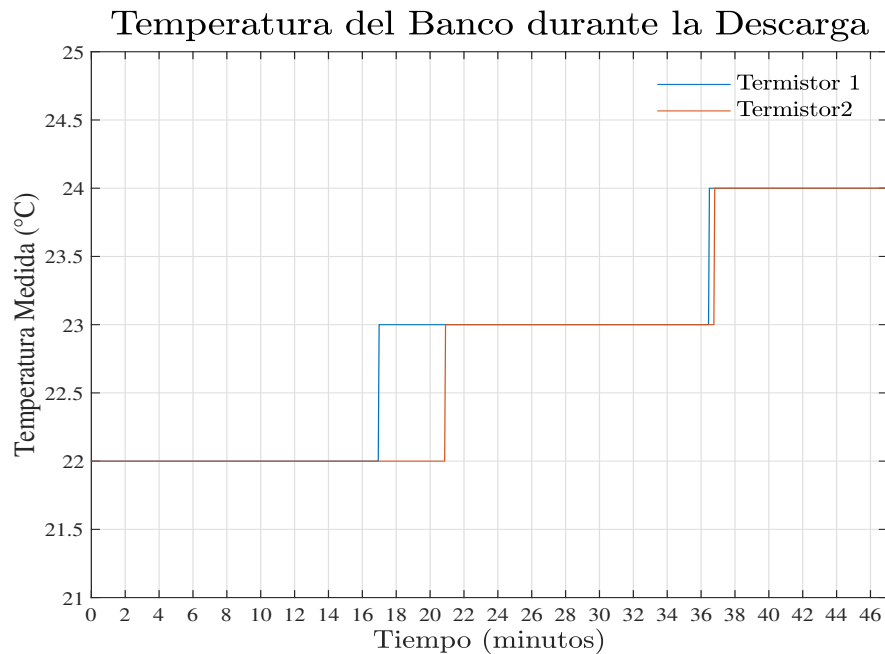


Figura 5.44: Temperatura del banco de baterías durante la Descarga

Fuente: Autores

### 5.3.5. Tercera Prueba con una Carga Resistiva

Como prueba final, y para verificar que la capacidad energética de las celdas es mucho mayor a la obtenida en las pruebas anteriores, se realizó una nueva carga y descarga del banco de baterías, en esta ocasión se empleó el equipo DE LORENZO DL 1059, el cual es una fuente de alimentación de potencia, capaz de entregar hasta una salida de voltaje variable de hasta 220 VDC, 28 A a través de un puente trifásico con un rizado máximo del 4.2 % [35].

Cabe señalar que los datos obtenidos durante esta prueba fueron tomados únicamente con el analizador de energía HIOKI PW3337.

Como primer punto de esta prueba se tomó el banco ya cargado, con el cargador PB-360P-24, y se lo llevó de los 28.7 V hasta 31.1 V usando la fuente DE LORENZO DL 1059. En la Figura 5.45 se aprecia el voltaje del banco durante la carga, con su correspondiente corriente de carga en la Figura 5.46.

En la Figura 5.47 se observa la que el banco almacena una carga eléctrica de 20.70 Ah, este valor, multiplicado por el voltaje promedio alcanzado de 31.1 V nos da un valor de 643 Wh, el cual es semejante a los 612 Wh alcanzados durante la carga, presentado en 5.48.

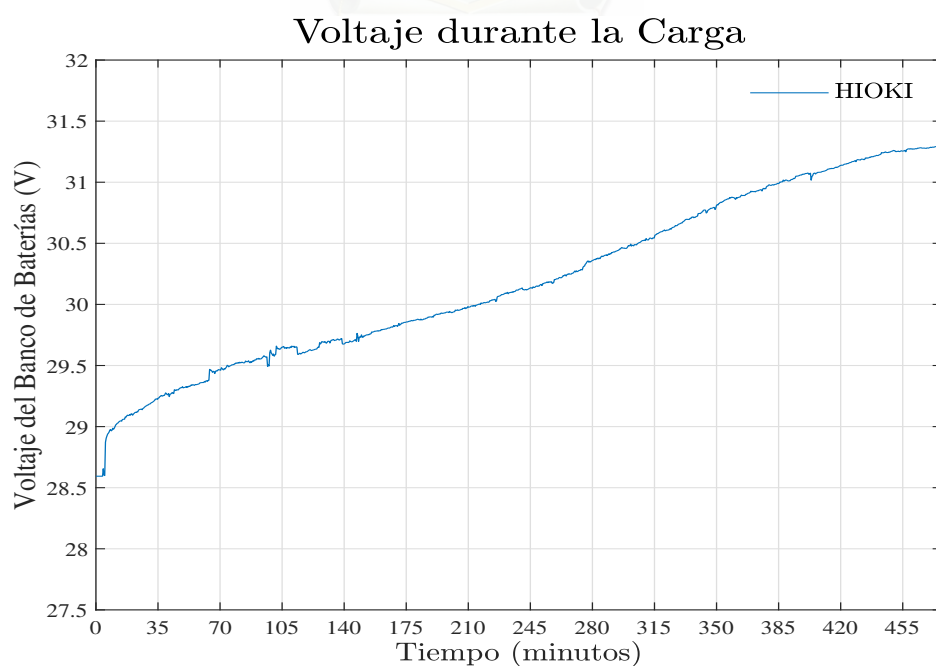


Figura 5.45: Voltaje Durante la Carga  
Fuente: Autores

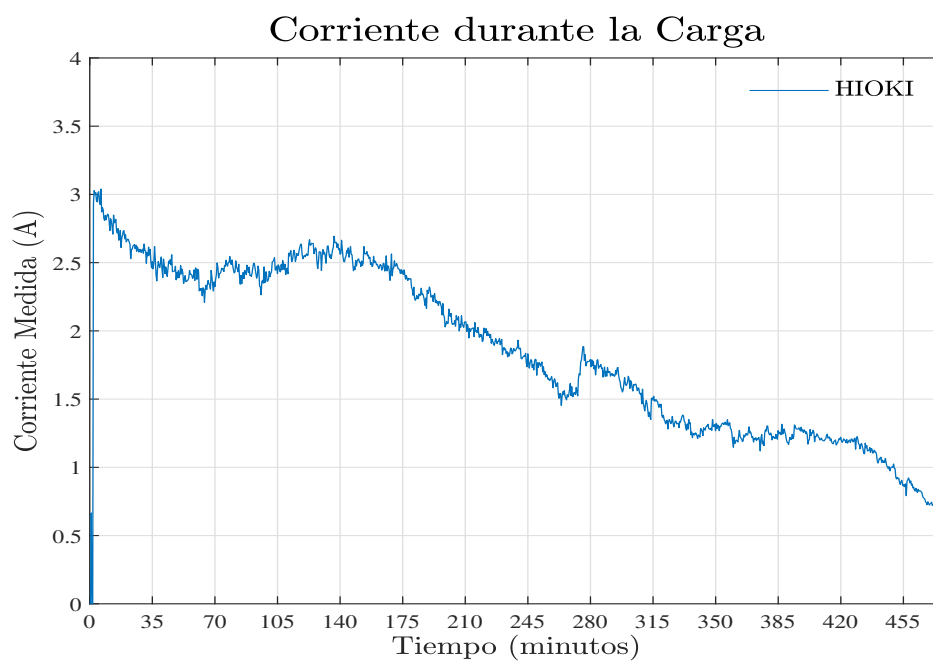


Figura 5.46: Corriente del Banco durante la Carga

Fuente: Autores

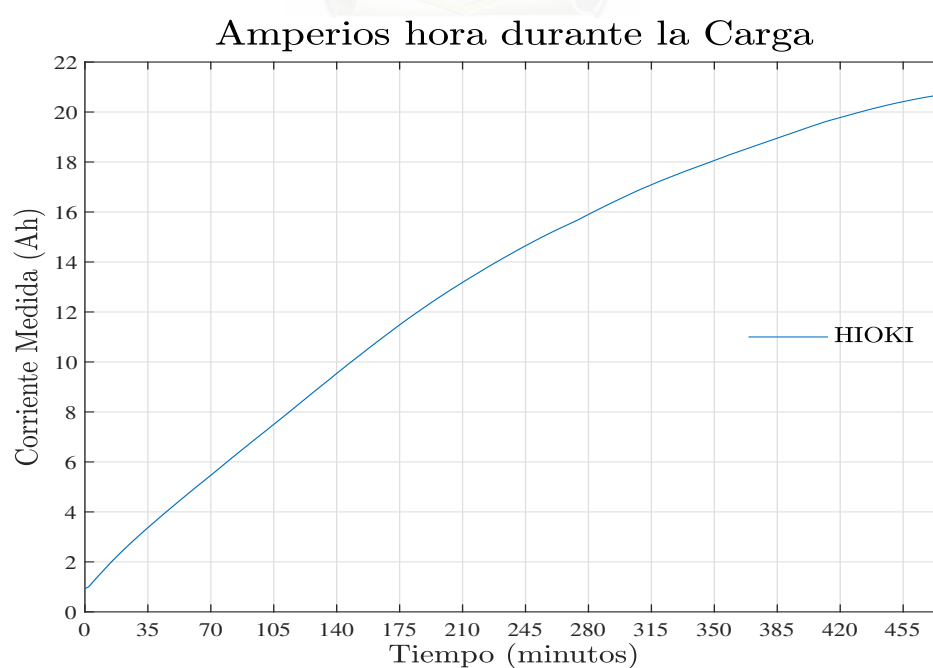


Figura 5.47: Amperios hora durante la Carga

Fuente: Autores



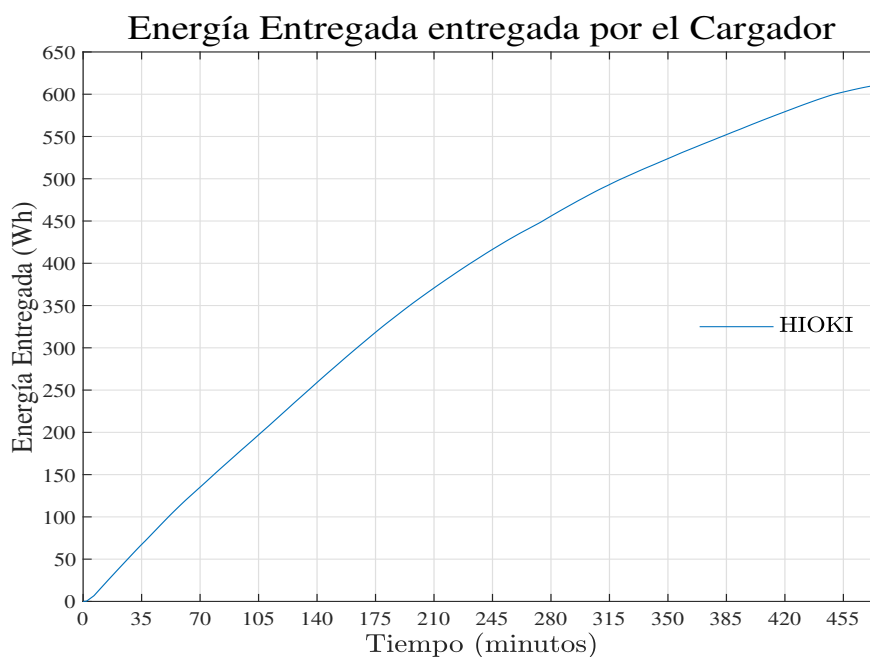


Figura 5.48: Energía Entregada por el Cargador

Fuente: Autores

La última parte de esta prueba consiste en realizar una descarga con una resistencia con el objetivo de verificar si se puede o no entregar una energía aproximada a la que recibió el banco de baterías. Para esto se empleó una carga resistiva de  $1.7 \Omega$ .

En la Figura 5.49 se muestra el voltaje del banco de baterías durante la descarga, la cual duró aproximadamente 70 minutos con una corriente de 19 A hasta 15 A, como indica la Figura 5.50.

En la Figura 5.49 se observa que luego de los 70 minutos se desconectó la carga resistiva, produciendo que el voltaje del banco aumente desde 23.44 V hasta 25.34 V en el minuto 89, esto debido a la caída de tensión que existe cuando el banco se encuentra suministrando energía.

En cuanto a la energía entregada por el banco durante la descarga, Figura 5.51 y carga eléctrica entregada, Figura 5.52, se tiene una transferencia de 557.26 Wh con 20.34 Ah.

Con estos valores se procede a calcular la eficiencia del banco, de manera similar como en las pruebas anteriores:

$$\begin{aligned} Eficiencia &= \frac{Wh_{Entregados}}{Wh_{Recibidos}} \\ Eficiencia &= \frac{557,26Wh}{612Wh} \\ Eficiencia &= 0,9105 \\ Eficiencia &= 91,05\% \end{aligned} \quad (5.3)$$

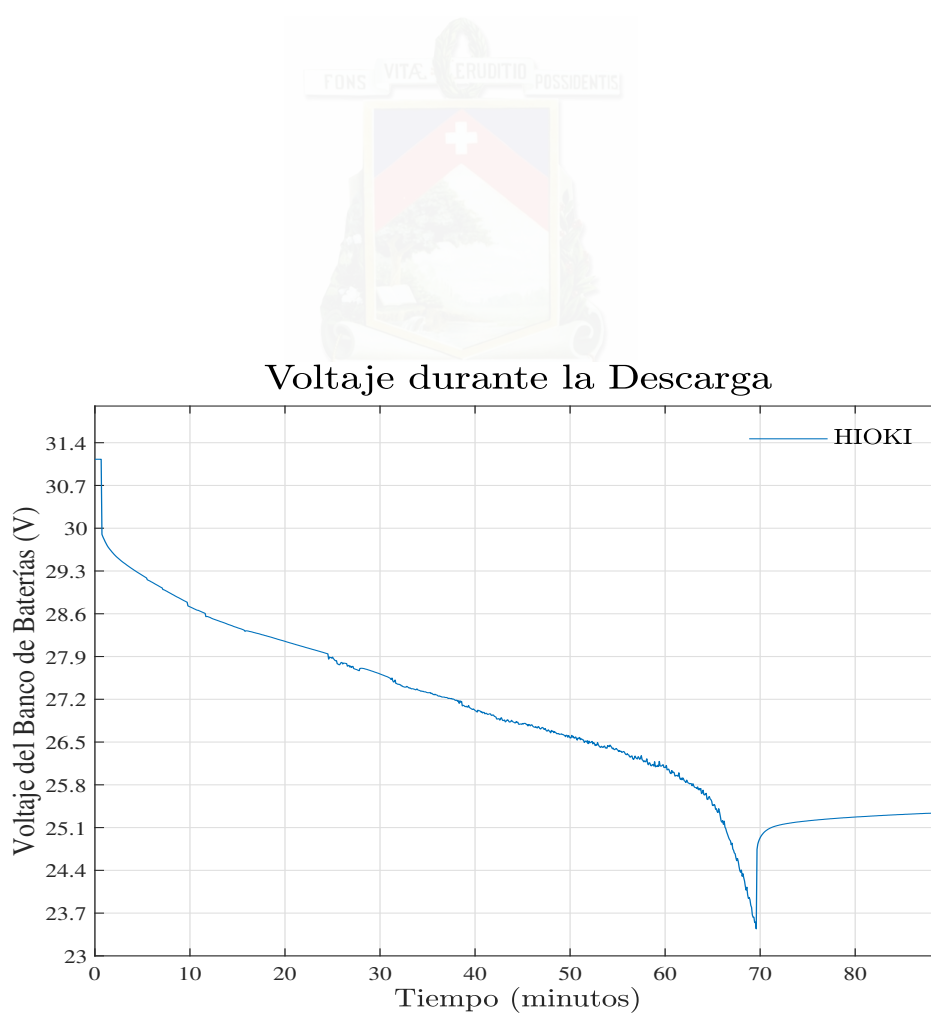


Figura 5.49: Voltaje Durante la Descarga  
Fuente: Autores

### Corriente durante la Descarga

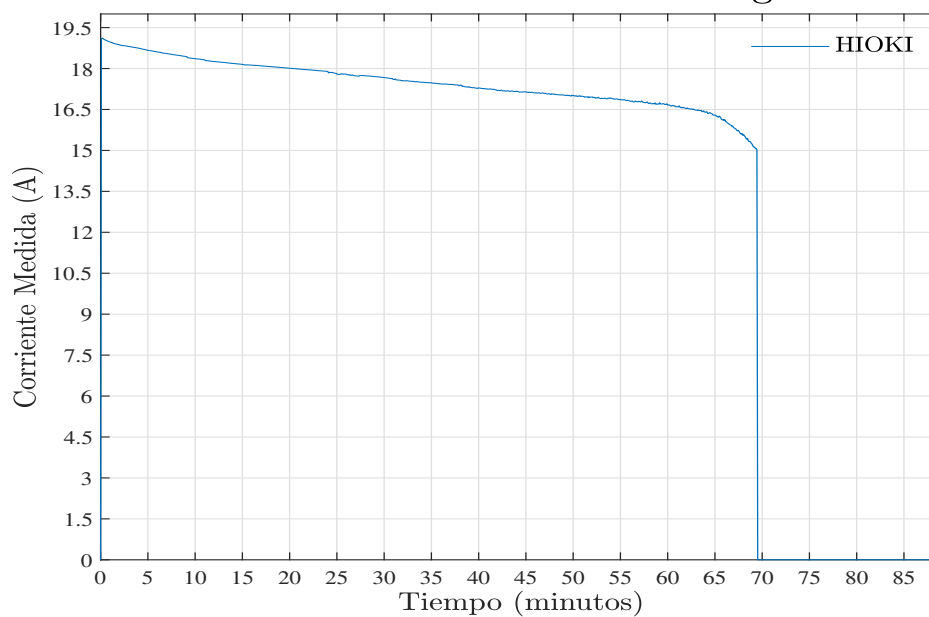


Figura 5.50: Corriente del Banco durante la Descarga

Fuente: Autores

### Energía Entregada durante la Descarga

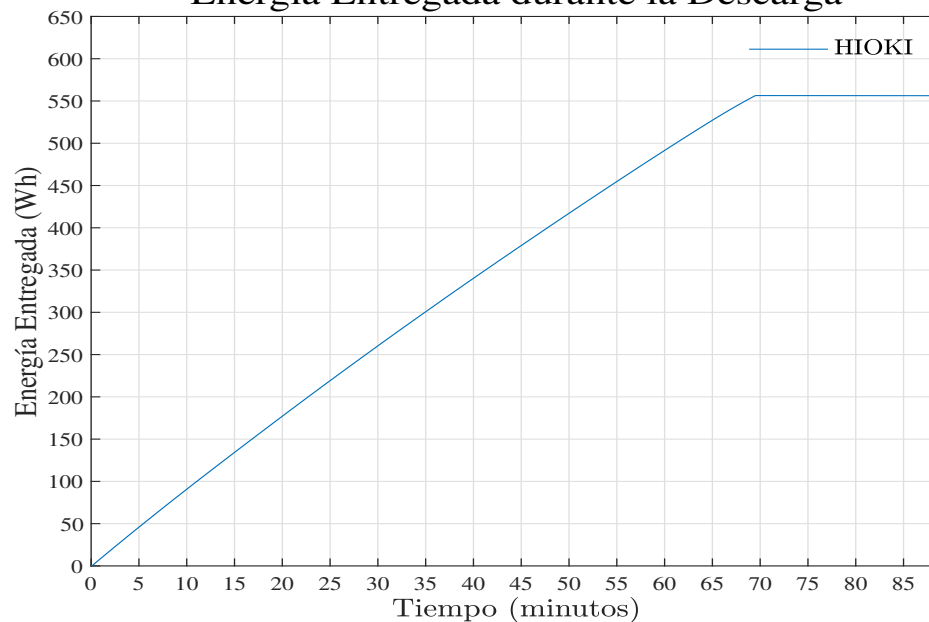


Figura 5.51: Energía Entregada por banco de baterías

Fuente: Autores

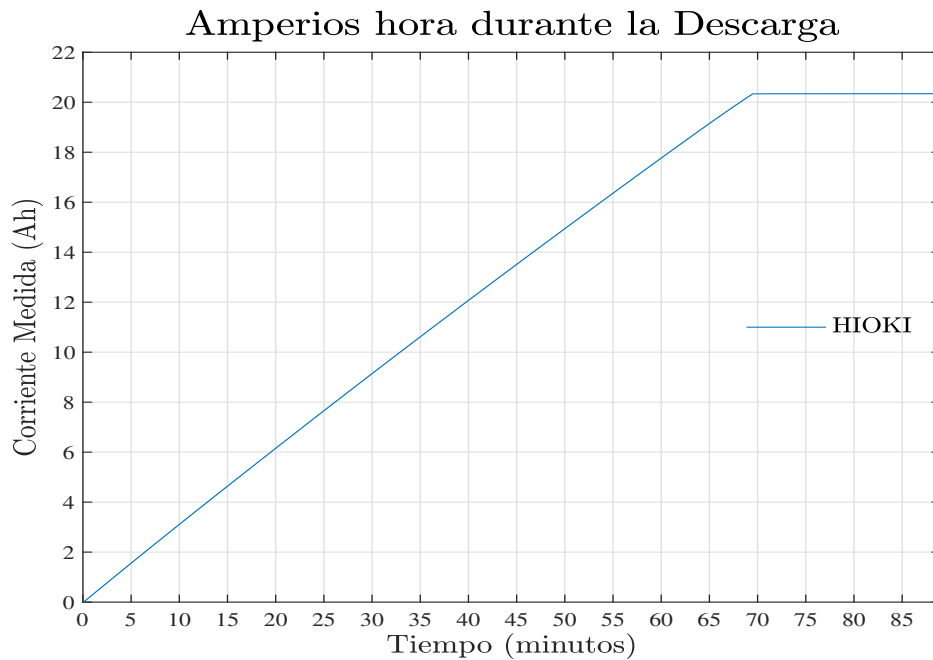


Figura 5.52: Amperios hora durante la Descarga

Fuente: Autores

### 5.3.6. Consumo energético del exoesqueleto

Las últimas mediciones que se tienen consisten en el consumo energético de una de las piernas del exoesqueleto (3 motores). Para obtener este consumo se realizaron 2 pruebas obteniendo las curvas de voltaje, corriente, amperios hora y watts hora.

La primera prueba consistió en medir el consumo del exoesqueleto sin carga, es decir, dejando que los motores movieran el exoesqueleto sin ningún peso adicional. En las Figuras F.26, F.27, F.28 y F.29 se observan los resultados de voltaje, corriente, amperios hora y watts hora, respectivamente, durante esta prueba.

En la Figura F.26 se aprecia una caída de tensión en el momento en el cual el exoesqueleto comienza a realizar su movimiento, esto debido a la resistencia interna de la fuente. Se observa además en la Figura F.27 de 1 A aproximadamente, lo cual indica apenas un consumo de 1.38 Wh durante los 10 minutos que duró la prueba.

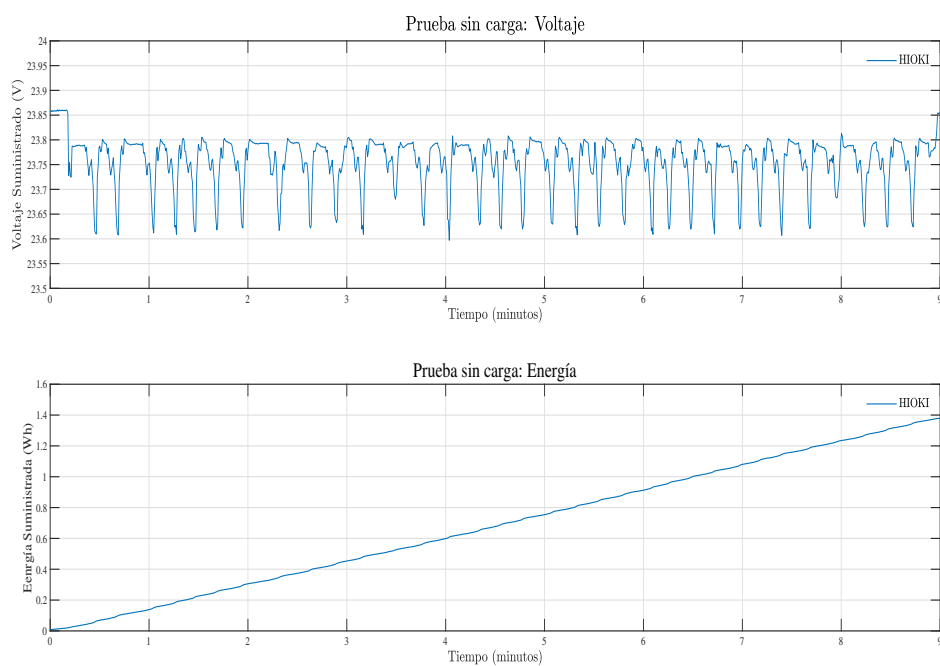


Figura 5.53: Voltaje durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

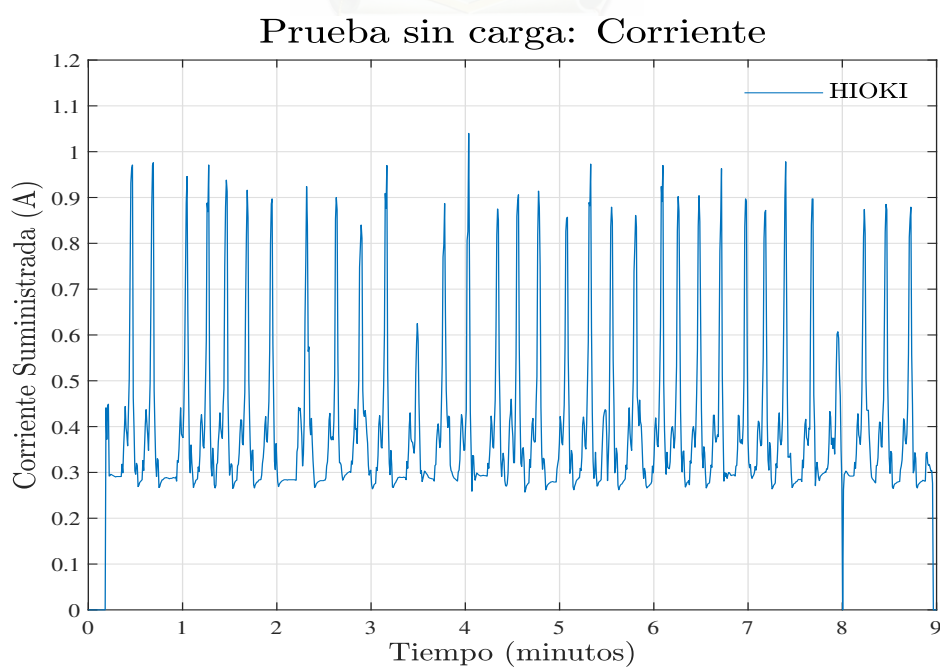


Figura 5.54: Corriente durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

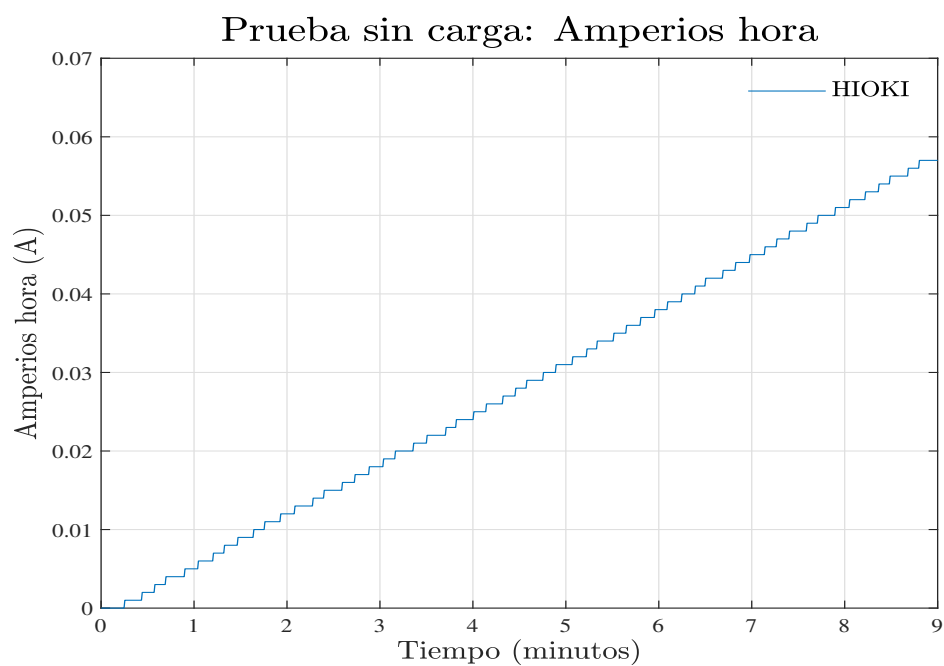


Figura 5.55: Amperios hora durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

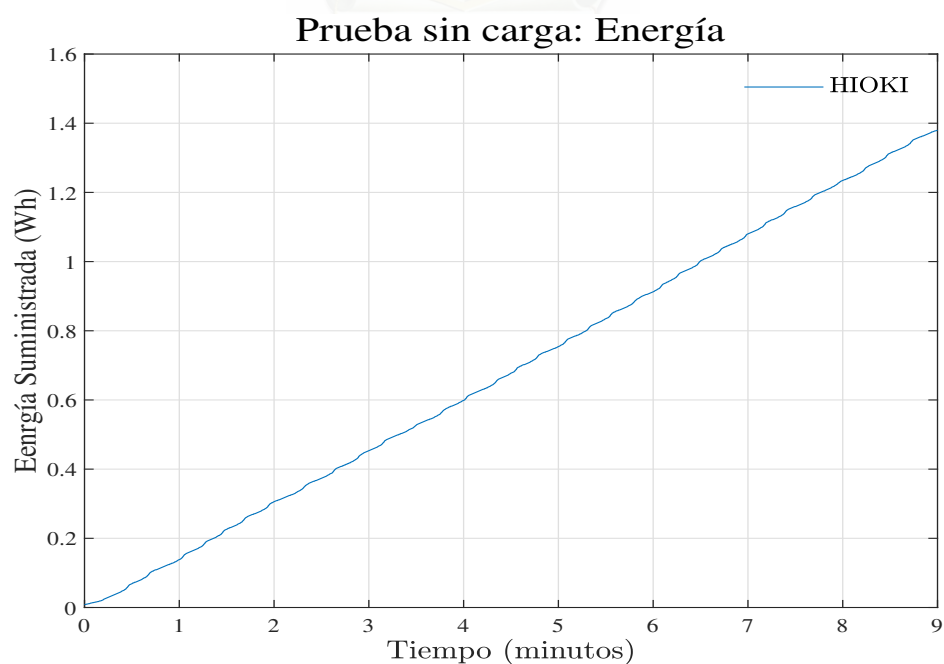


Figura 5.56: Energía durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

La segunda parte consistió en usar una carga de 15kg distribuida en los diferentes motores que conforman el exoesqueleto y de esta forma medir un consumo más real. En las Figuras F.30, F.31, F.32 y ?? se observan los resultados de voltaje, corriente, amperios hora y watts hora, respectivamente, durante esta prueba.

En este caso, según lo indica la Figura F.31, se tuvo un consumo mayor que la prueba sin carga, unos 2 A en promedio, esto se vio reflejado como un aumento de 0.56 Wh en la energía consumida por el exoesqueleto, F.33.

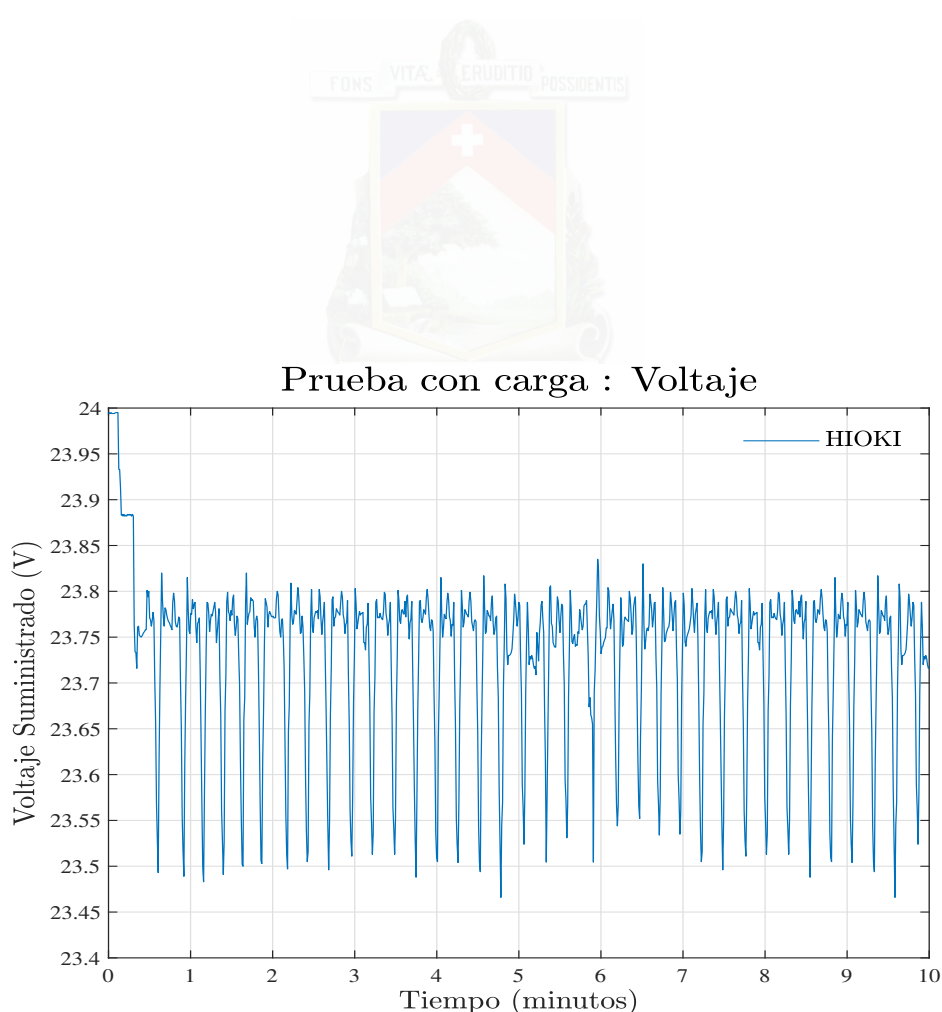


Figura 5.57: Voltaje durante la prueba sin carga  
Fuente: Autores

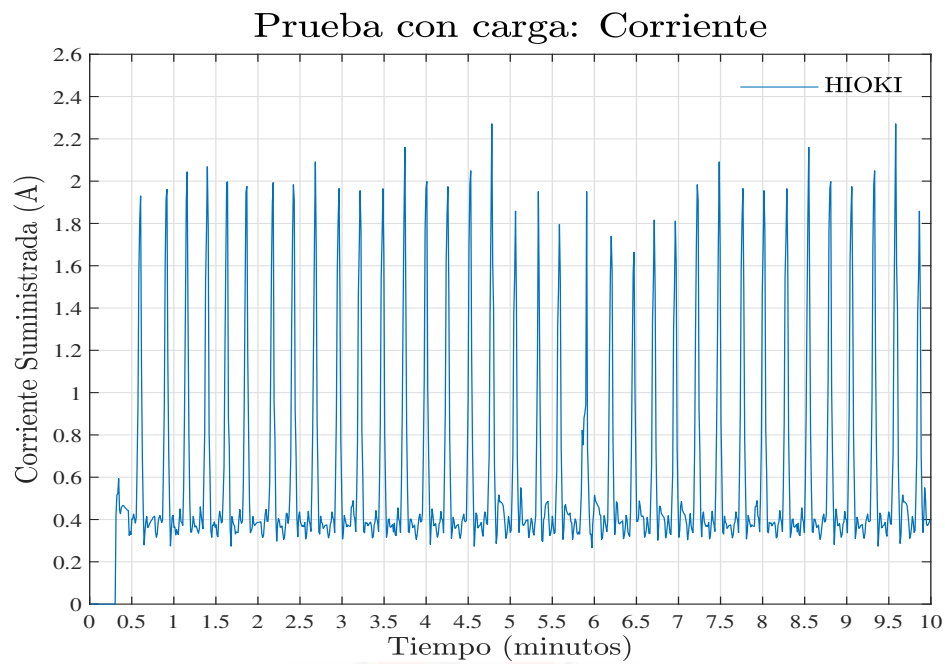


Figura 5.58: Corriente durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

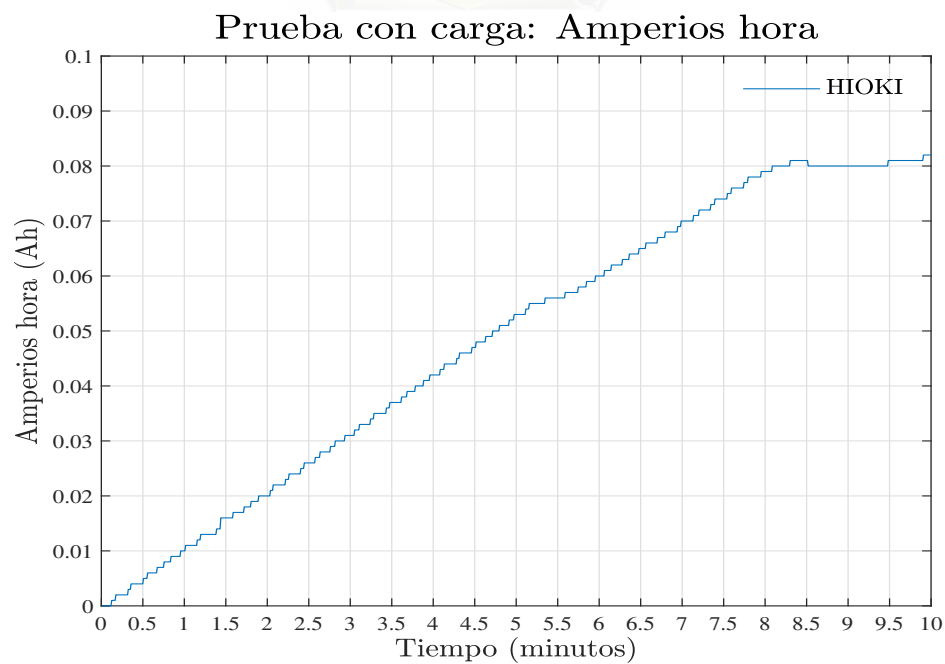


Figura 5.59: Amperios hora durante la prueba sin carga

Fuente: Autores



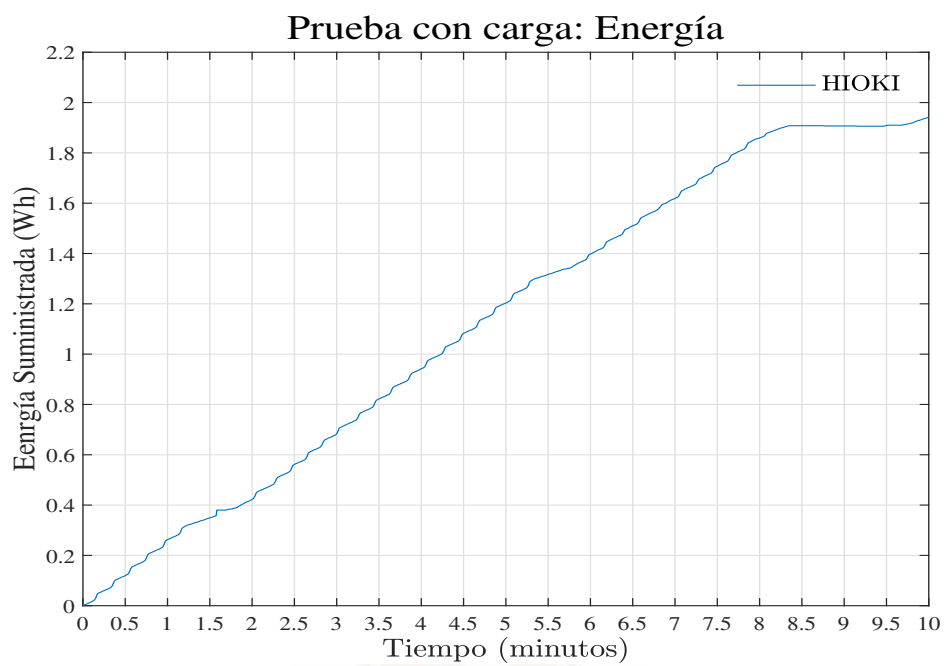


Figura 5.60: Energía durante la prueba sin carga

Fuente: Autores



## Capítulo 6

# Conclusiones

Es te último capítulo presenta las conclusiones a las que se llegó luego de haber realizado las correspondientes pruebas tanto con los prototipos cómo con el diseño final del sistema de gestión de energía. Se presentan, además, las ideas o puntos a mejorar del sistema para ser utilizados a manera de trabajos futuros.

## 6.1. Conclusiones

Al trabajar con baterías de ion de litio se puede constatar las ventajas que tienen estas con respecto a baterías de diferente composición, entre las más destacadas tenemos su eficiencia y ciclo de vida; sin embargo, al trabajar con este tipo de baterías, es indispensable contar con sistemas de gestión de las mismas, el cual nos permita monitorizar constantemente sus parámetros de funcionamiento como son: voltajes, corrientes, consumo energético, temperatura, etc; permitiéndonos así anticiparnos ante posibles fallas que atenten contra la integridad del sistema o del banco de baterías y actuar de manera oportuna si se llegase a presentar alguna.

El sistema propuesto está diseñado con un sobre dimensionamiento de los requerimientos energéticos, con la finalidad de permitir alimentar dispositivos y prototipos futuros, y así poder entregar niveles de corrientes más altos que los necesarios actualmente.

El balanceo de las celdas, como se observa en los resultados, es recomendable realizarse antes de obtener una gran diferencia de voltajes entre celdas, de lo contrario tomará mucho más tiempo equilibrar estas, además el desperdicio energético producido por el balanceo será mayor y por ende la vida útil de estas se reducirá con mayor rapidez.

La descarga de las celdas no produjo un desequilibrio considerable entre estas, debido a que son equipos relativamente nuevos y que la descarga se produjo usando todo el banco y no solo unas celdas seleccionadas. Sin embargo, con el paso del tiempo esta diferencia de voltajes irá incrementando poco a poco, lo que significaría tener que reemplazar una o más de las celdas. La detección de la celda fallida podría realizarse comparando los voltajes y resistencia interna de cada una.

En todas las pruebas realizadas con el sistema no se produjo ningún evento que pudiese afectar al mismo o al banco de baterías. En cuanto a las temperaturas alcanzadas por el banco de baterías, el sistema muestra que este se encuentra trabajando a temperaturas normales (entre 21 °C a 24 °C), por lo que no existe peligro de sobrecalentamiento.

El empleo de un microcontrolador para comandar el [CI LTC6802-2](#) permite que el sistema sea compatible con cualquier dispositivo que sea compatible con la interfaz serial RS232, es decir, permite al sistema [BMS](#) conectarse a cualquier otro computador o dispositivo móvil, a diferencia de que si se hubiera implementado la raspberry como controlador del LTC6802-2.

Si bien los dispositivos utilizados para la medición de los parámetros de corriente y temperatura requieren una calibración previa, se logró que funcionaran de manera eficiente para este sistema como se pudo comprobar al realizar las mediciones con la herramienta [HIOKI PW3337](#), para el caso del sensor corriente, y midiendo la temperatura corporal para el caso de los termistores.



La eficiencia del banco de baterías, de acuerdo con las pruebas realizadas, es mayor al 90 %, con lo cual se comprueba que las baterías con tecnologías de ion de litio tienen una eficiencia mucho mayor a comparación con baterías de distinta tecnología.

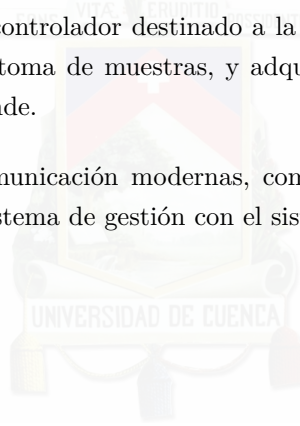
## 6.2. Trabajos Futuros

Implementar el método de contador de coulombs para determinar el estado de carga (SoC) del banco de baterías utilizando CI diseñados para esta tarea.

Adquirir ó diseñar un cargador de baterías de acuerdo a la capacidad del banco de baterías, con el propósito de realizar la carga al 100 % de la capacidad del mismo.

Implementar un segundo microcontrolador destinado a la recolección de datos de los sensores para aumentar la velocidad de toma de muestras, y adquirir un sensor de corriente con una capacidad de muestreo más grande.

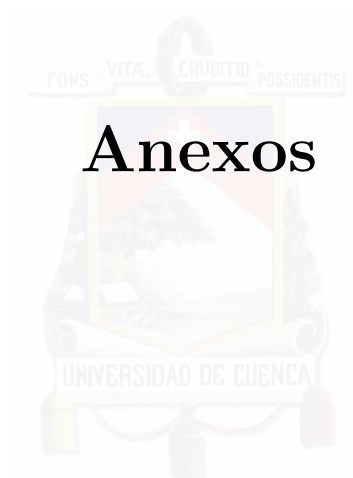
Implementar tecnologías de comunicación modernas, como Ethernet o tecnologías Wireless, para la comunicación entre el sistema de gestión con el sistema central.



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
desde 1867



# Anexos



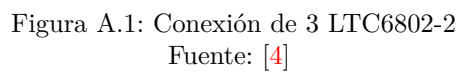
UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*

## Anexo A

# Diagramas, Esquemas y Tablas del CI LTC6802-2

### A.1. Conexión de 3 CI LTC6802-2 a un mismo microcontrolador

En la Figura [A.1](#) se tiene un banco de baterías de 96 celdas, con una interfaz aislada. En este diagrama, el negativo de la batería está aislado de la conexión a tierra del módulo. Los optoacopladores o los aisladores digitales permiten abordar cada [CI](#) individualmente. Este es un esquema simplificado que muestra la arquitectura básica de múltiples [CI](#).



## A.2. Registros

Tabla A.1: Registros de Lectura de Voltaje de Celdas

REGISTRO	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT1	BIT 0
CVR00	RD	C0V[7]	C0V[6]	C0V[5]	C0V[4]	C0V[3]	C0V[2]	C0V[1]	C0V[0]
CVR01	RD	C1V[7]	C1V[6]	C1V[5]	C1V[4]	C1V[3]	C1V[2]	C1V[1]	C1V[0]
CVR02	RD	C2V[7]	C2V[6]	C2V[5]	C2V[4]	C2V[3]	C2V[2]	C2V[1]	C2V[0]
CVR03	RD	C3V[7]	C3V[6]	C3V[5]	C3V[4]	C3V[3]	C3V[2]	C3V[1]	C3V[0]
CVR04	RD	C4V[7]	C4V[6]	C4V[5]	C4V[4]	C4V[3]	C4V[2]	C4V[1]	C4V[0]
CVR05	RD	C5V[7]	C5V[6]	C5V[5]	C5V[4]	C5V[3]	C5V[2]	C5V[1]	C5V[0]
CVR06	RD	C6V[7]	C6V[6]	C6V[5]	C6V[4]	C6V[3]	C6V[2]	C6V[1]	C6V[0]
CVR07	RD	C7V[7]	C7V[6]	C7V[5]	C7V[4]	C7V[3]	C7V[2]	C7V[1]	C7V[0]
CVR08	RD	C8V[7]	C8V[6]	C8V[5]	C8V[4]	C8V[3]	C8V[2]	C8V[1]	C8V[0]
CVR09	RD	C9V[7]	C9V[6]	C9V[5]	C9V[4]	C9V[3]	C9V[2]	C9V[1]	C9V[0]
CVR10	RD	C10V[7]	C10V[6]	C10V[5]	C10V[4]	C10V[3]	C10V[2]	C10V[1]	C10V[0]
CVR11	RD	C11V[7]	C11V[6]	C11V[5]	C11V[4]	C11V[3]	C11V[2]	C11V[1]	C11V[0]
CVR12	RD	C12V[7]	C12V[6]	C12V[5]	C12V[4]	C12V[3]	C12V[2]	C12V[1]	C12V[0]
CVR13	RD	C13V[7]	C13V[6]	C13V[5]	C13V[4]	C13V[3]	C13V[2]	C13V[1]	C13V[0]
CVR14	RD	C14V[7]	C14V[6]	C14V[5]	C14V[4]	C14V[3]	C14V[2]	C14V[1]	C14V[0]
CVR15	RD	C15V[7]	C15V[6]	C15V[5]	C15V[4]	C15V[3]	C15V[2]	C15V[1]	C15V[0]
CVR16	RD	C16V[7]	C16V[6]	C16V[5]	C16V[4]	C16V[3]	C16V[2]	C16V[1]	C16V[0]
CVR17	RD	C17V[7]	C17V[6]	C17V[5]	C17V[4]	C17V[3]	C17V[2]	C17V[1]	C17V[0]

Fuente: [4]

Tabla A.2: Registros de Temperatura

REGISTRO	RD/WR	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT1	BIT 0
TMPR0	RD	ETMP1[7]	ETMP1[6]	ETMP1[5]	ETMP1[4]	ETMP1[3]	ETMP1[2]	ETMP1[1]	ETMP1[0]
TMPR1	RD	ETMP2[3]	ETMP2[2]	ETMP2[1]	ETMP2[0]	ETMP1[11]	ETMP1[10]	ETMP1[9]	ETMP1[8]
TMPR2	RD	ETMP2[11]	ETMP2[10]	ETMP2[9]	ETMP2[8]	ETMP2[7]	ETMP2[6]	ETMP2[5]	ETMP2[4]
TMPR3	RD	ITMP[7]	ITMP[6]	ITMP[5]	ITMP[4]	ITMP[3]	ITMP[2]	ITMP[1]	ITMP[0]
TMPR4	RD	REV[2]	REV[1]	REV[0]	C4V[4]	ITMP[7]	ITMP[7]	ITMP[7]	ITMP[7]

Fuente: [4]



## Anexo B

# Calibración de Sensores

### B.1. Termistor NTC NTCLE413

La calibración del sensor NTC NTCLE413 consiste en encontrar las ecuaciones que conviertan el voltaje dado y lo traduzcan a un determinado valor de temperatura. Este voltaje es dependiente del valor de la resistencia del termistor, por lo que el primer paso consiste en conocer el valor de esta resistencia.

Para determinar la resistencia del termistor a una temperatura dada es necesario referirse a la data técnica del component e[25]. Aquí se nos entrega la Tabla B.1, en donde se observa que para una determinada temperatura se tiene un rango de valores de resistencia, es decir, una resistencia máxima y mínima.

Para determinar el voltaje en el pin  $V_{TEMPx}$ , se debe resolver el circuito de la Figura B.1, con diferentes temperaturas, en donde la resistencia en serie,  $R_{SERIE}$ , toma un valor de 10K ohmios. En este caso si simulará la variación de temperatura cambiando el valor de la resistencia  $TERMISTOR$  colocando los valores máximos y mínimos de la Tabla B.1 para una temperatura dada, luego se determinará la corriente máxima y mínima para finalmente obtener el voltaje  $V_{TEMPx}$ .

Resolviendo el circuito de la Figura anterior se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla B.2 con sus respectivas gráficas en la Figura B.2. En esta Figura se observa que ambas curvas de voltajes máximos y mínimos se asemejan mucho a una recta, esta similitud se tomará en cuenta para diseñar una aproximación y programarla dentro del microcontrolador para determinar, en base al voltaje medido, la temperatura que actúa sobre cada termistor.

Tabla B.1: Registros de Lectura de Voltaje de Celdas

Temperatura (°C)	$R_{min}$ ( $\Omega$ )	$R_{max}$ ( $\Omega$ )
0	26783	27913
5	21702	22515
10	17689	18270
15	14499	14912
20	11949	12239
25	9900	10100
30	8211,70	8409,8
35	6845,50	7036,7
40	5734,10	5915,6
45	4825,60	4995,7
50	4079,20	4237,3
55	3463,20	3609,2
60	2952,50	3086,8
65	2527,30	2650,4
70	2171,70	2284,3
75	1873,10	1976
80	1621,50	1715,3
85	1408,50	1494,2
90	1227,70	1305,8
95	1073,60	1144,8
100	941,74	1006,8

Fuente: [4]

Tabla B.2: Valores de voltaje máximos y mínimos para los rangos de resistencias del termistor

Temperatura (°C)	$R_{min}$ ( $\Omega$ )	$V_{min}$ (V)	$R_{max}$ ( $\Omega$ )	$V_{max}$ (V)
0	26783	2,239	27913	2,2639
5	21702	2,105	22515	2,1293
10	17689	1,9645	18270	1,9873
15	14499	1,8198	14912	1,8407
20	11949	1,674	12239	1,6923
25	9900	1,5298	10100	1,5451
30	8211,7	1,3865	8409,8	1,4047
35	6845,5	1,2496	7036,7	1,2701
40	5734,1	1,1206	5915,6	1,1429
45	4825,6	1,0009	4995,7	1,0244
50	4079,2	0,8909	4237,3	0,9152

Fuente: [25]

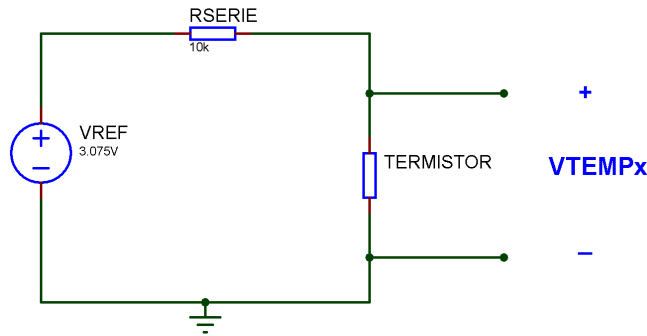


Figura B.1: Circuito del termistor  
Fuente: [20]

Para realizar la aproximación de estas dos curvas se optó por usar el método punto pendiente para formar una ecuación de primer grado. La fórmula se presenta en la ecuación B.1.

$$y - y_i = m(x - x_i) \quad (B.1)$$

En donde  $x_i$  e  $y_i$  son dos puntos cualquiera de la recta y  $m$  es la pendiente de la recta.

Para determinar la pendiente de la recta se usa la ecuación B.2, en la cual  $x_j$  e  $y_j$  es otro punto que pertenece a la recta de la ecuación B.1.

$$m = \frac{x_i - x_j}{y_i - y_j} \quad (B.2)$$

Tomando como puntos  $(x_i, y_i)$  los puntos iniciales de la recta de voltaje mínimo (2,239, 0) y como puntos  $(x_j, y_j)$  los puntos finales de la misma recta (0,8908, 50), se obtiene una pendiente  $m = -37,0895$ . De la misma forma, tomando los puntos de la recta de voltaje máximo, se tiene una pendiente  $m = -37,0713$ . Por lo tanto, la aproximación de las rectas de la Figura B.2 están dadas por las ecuaciones B.3 y B.4, en donde  $x$  es el voltaje dado en el pin VTEMPx.

$$t_{min} = -50 - 37,0895(x - 0,8909) \quad (B.3)$$

$$t_{max} = -50 - 37,0713(x - 0,9152) \quad (B.4)$$

Implementando estas ecuaciones y los valores de voltaje mínimo y máximo de la Tabla B.2

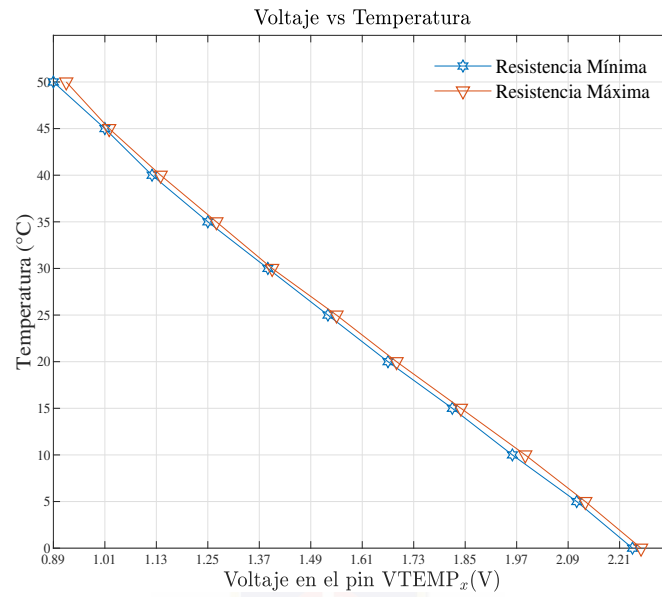


Figura B.2: Temperatura en función del voltaje medido usando valores de resistencia mínima y máxima

Fuente: Autores

se obtienen los resultados de Temperatura de la Tabla B.3, cuya gráfica de Datos Técnicos vs Aproximación se presenta en las Figuras B.3 y B.4.

Tabla B.3: Valores de temperaturas máximas y mínimos obtenidos con los voltajes de la Tabla B.2

Temperatura mínima (°C)	0	4,9695	10,1835	15,5468	20,9553	26,3055	31,6185	36,6975	41,4798	45,9217	50
Temperatura máxima (°C)	0	4,9916	10,2561	15,6914	21,1914	26,6462	31,8531	36,8437	41,5569	45,9506	50

Fuente: Autores

Como se observa en las Figuras B.3 y B.4, esta es una muy buena aproximación, por lo que las ecuaciones B.3 y B.4 se usarán para obtener los valores de temperatura.

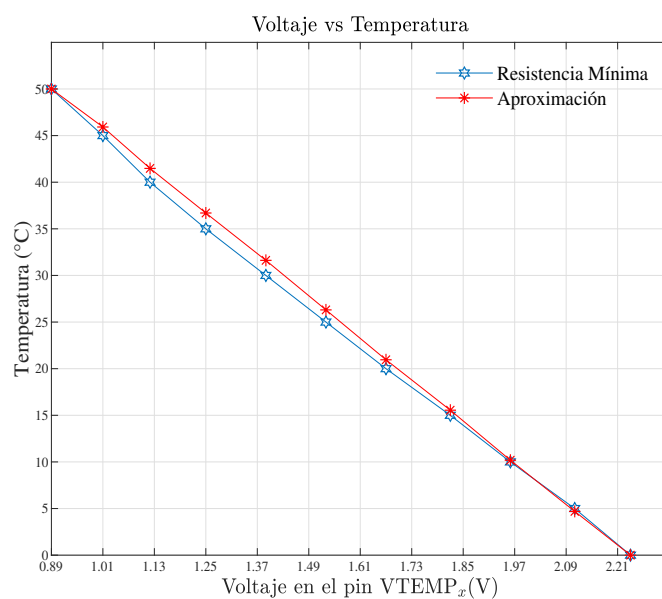


Figura B.3: Gráfica de temperatura vs voltaje usando los valores de resistencia mínima: Datos técnicos vs Aproximación

Fuente: Autores

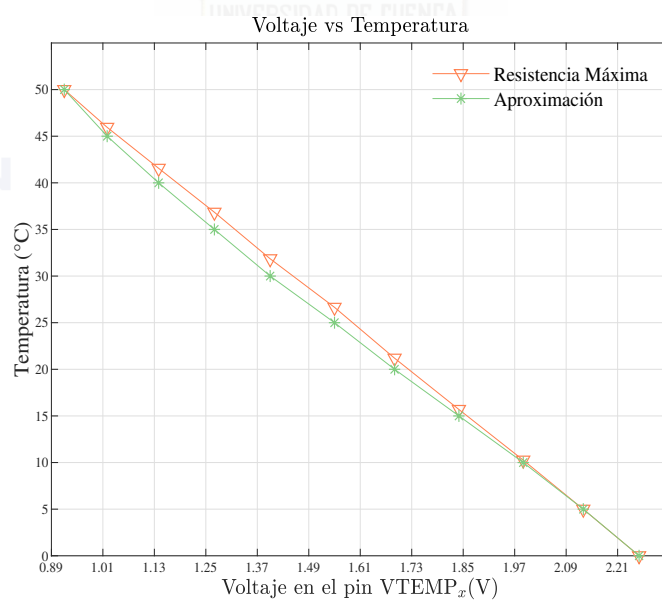


Figura B.4: Gráfica de temperatura vs voltaje usando los valores de resistencia máxima: Datos técnicos vs Aproximación

Fuente: Autores

## B.2. Sensor de Corriente ACS712

En [26] se indica que cada sensor ACS712 debe ser calibrado previamente usando la ecuación B.5 la cual presenta la fórmula para obtener el valor de la corriente en base al valor de voltaje entregado por el sensor.

$$\text{Corriente} = \frac{\text{Voltaje} - \text{offset}}{\text{Sensibilidad}} \quad (\text{B.5})$$

En dónde **Corriente** es el valor de la corriente que pasa por el sensor, **Voltaje** es el valor del voltaje dado por el sensor, **offset** es el voltaje dado por el sensor con una corriente de 0 A y **Sensibilidad** es la pendiente de la recta Voltaje vs Corriente dada por la ecuación B.6.

$$\text{Voltaje} - v_i = \text{Sensibilidad} * (\text{Corriente} - i_i) \quad (\text{B.6})$$

En donde  $(i_i, v_i)$  es un punto cualquiera de la ecuación B.6.

Despejando **Sensibilidad** de la ecuación B.6 se tiene:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{(v_i - v_j)}{(i_i - i_j)} \quad (\text{B.7})$$

Para obtener los valores de **Sensibilidad** y **offset** se comienza tomando una medición con una corriente de 0 A, obteniendo el voltaje de offset. La segunda muestra se realiza conectando una corriente diferente de 1.23 A (valor medido con la ayuda de un amperímetro) y obteniendo el correspondiente valor de voltaje, de tal forma que se tienen los dos puntos mostrados en la Tabla B.4

Tabla B.4: Valores de voltaje y corriente para la calibración del sensor de corriente

Voltaje dado por el sensor (V)	Corriente medida con amperímetro (A)
0.496 (*offset)	0
0.666	1.23

Fuente: Autores

Reemplazando estos valores en la ecuación B.7 se tiene un valor de sensibilidad de 0.134.



Con estos valores se tiene entonces que la ecuación para determinar la corriente es:

$$Corriente = \frac{(Voltaje - 0,496)}{0,134} \quad (B.8)$$

Aplicando la ecuación B.8, el sensor para diferentes valores de corriente, y usando un amperímetro para medir su valor, los resultados se presentan en la Tabla B.5.

Tabla B.5: Resultado de la calibración del sensor de corriente

Corriente medida con amperímetro (A)	Corriente medida con el sensor (A)	Error
1.23	1.24	0.8 %
2.87	2.86	0.3 %
3.50	3.52	0.5 %
4.29	4.31	0.4 %

Fuente: Autores

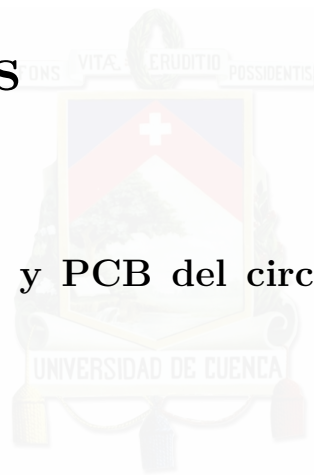
En vista a los resultados de la tabla anterior, se concluye que el sensor trabaja de forma bastante aproximada a la realidad por lo que se usará la ecuación 10 para recolectar los valores de corriente.



## Anexo C

# Diseño de los Circuitos Electrónicos

### C.1. Esquemáticos y PCB del circuito para el balanceo externo



UNIVERSIDAD DE CUENCA  
*desde 1867*



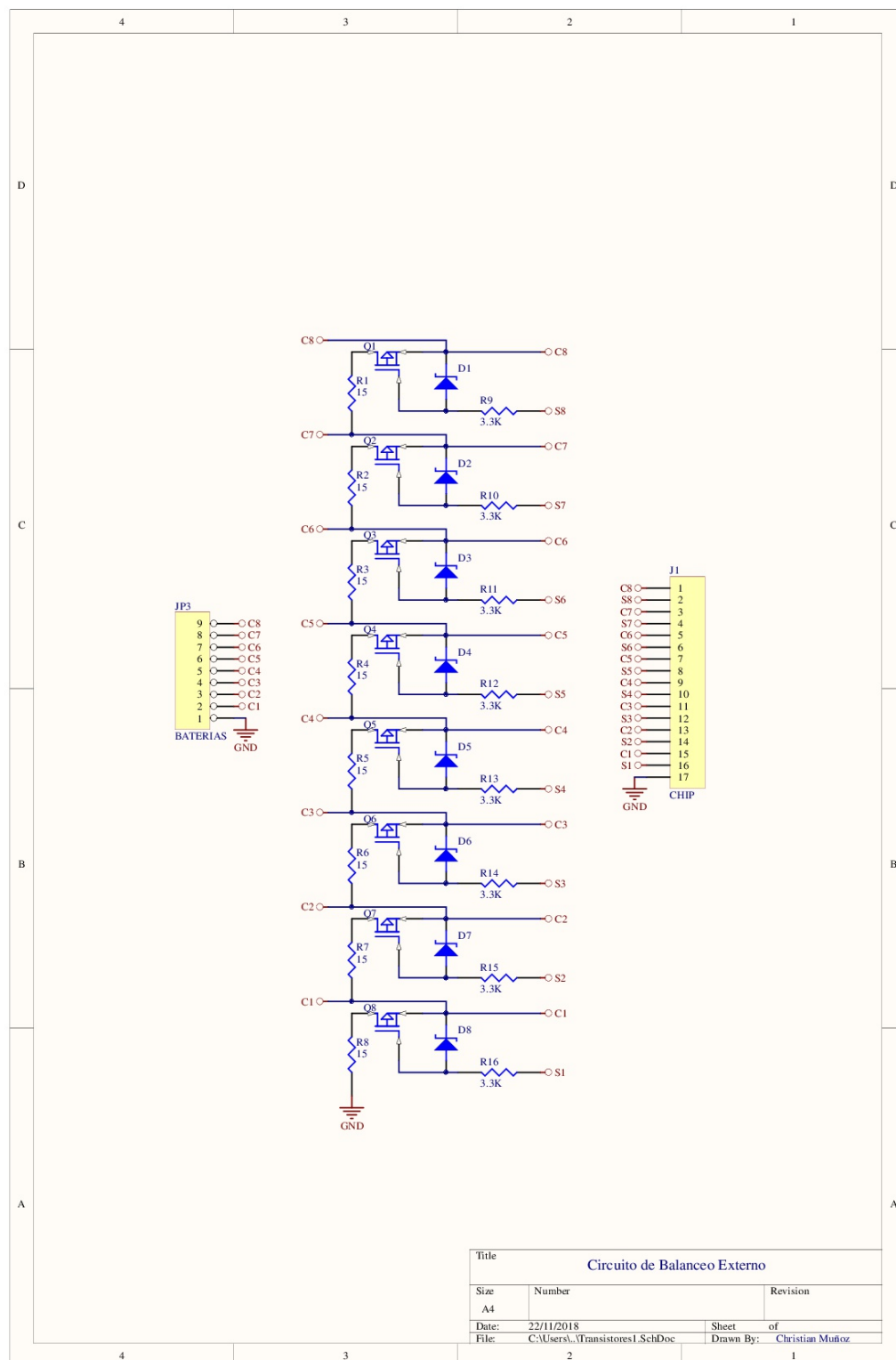


Figura C.1: Esquemático del circuito de balanceo externo  
Fuente: Autores

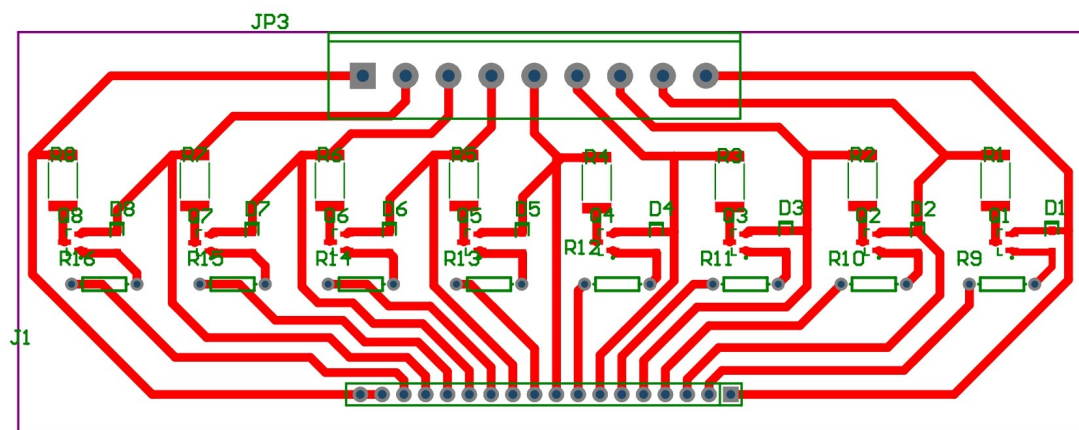


Figura C.2: Diseño del PCB del circuito de balanceo externo  
Fuente: Autores

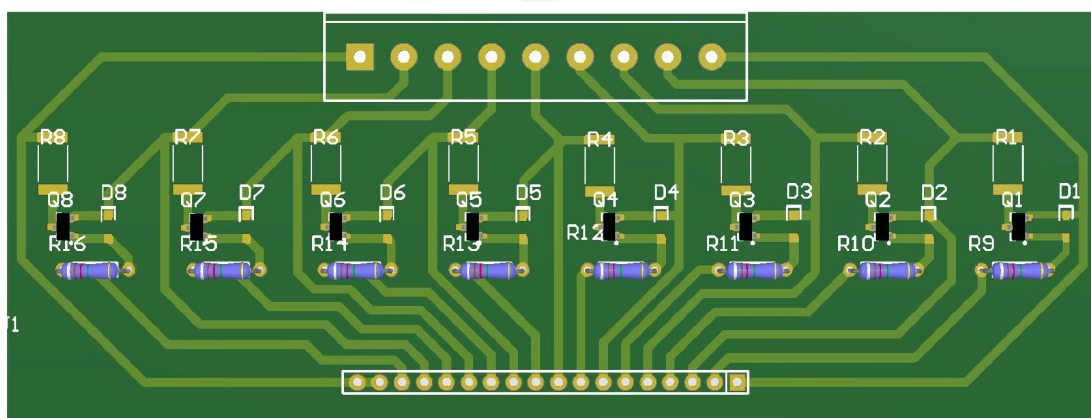


Figura C.3: Diseño del PCB en 3D del circuito de balanceo externo  
Fuente: Autores

## C.2. Esquemáticos y PCB del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura

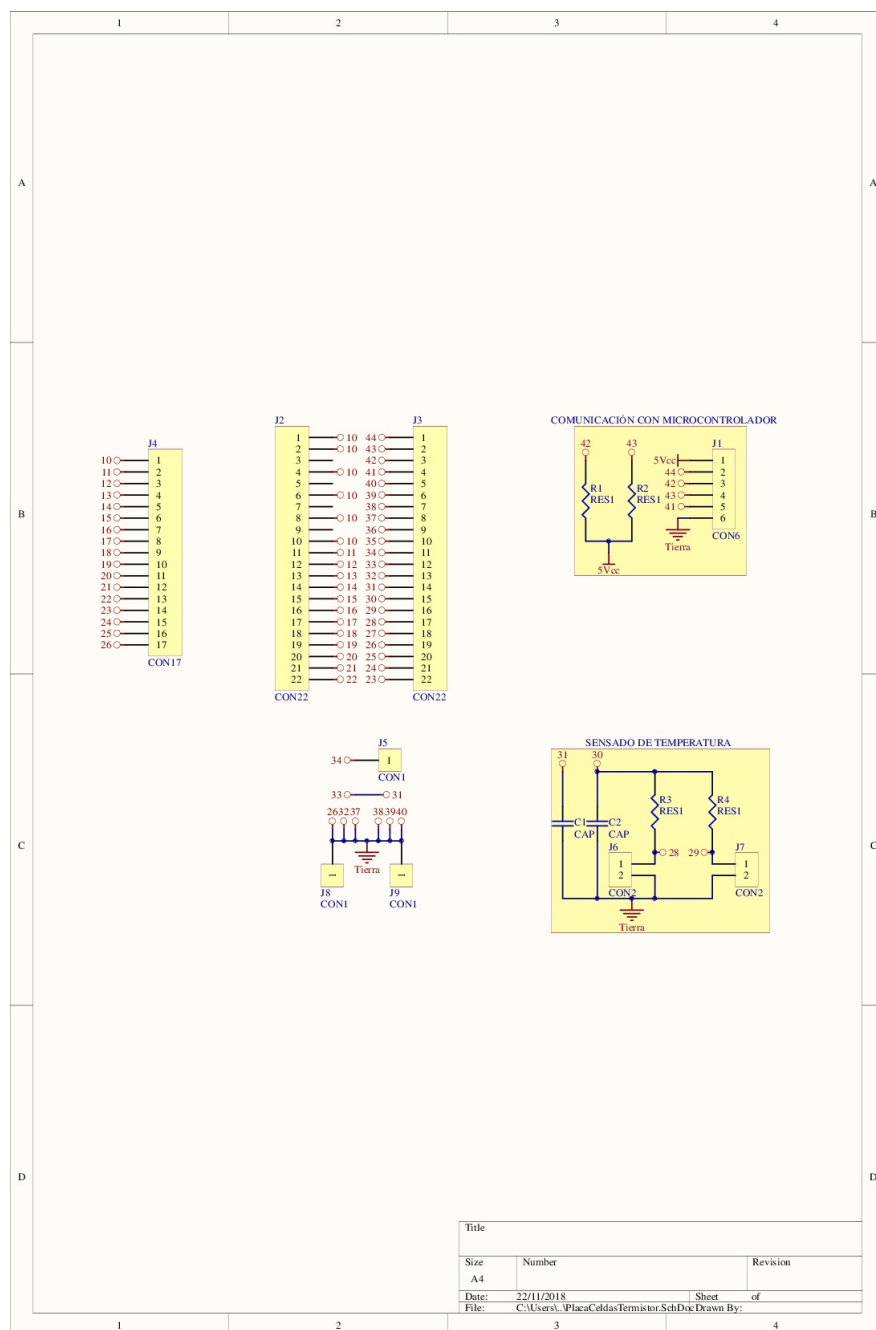


Figura C.4: Esquemático del circuito de comunicación SPI y sensado de temperatura  
Fuente: Autores



ndie

### C.3. Esquemáticos y PCB del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros

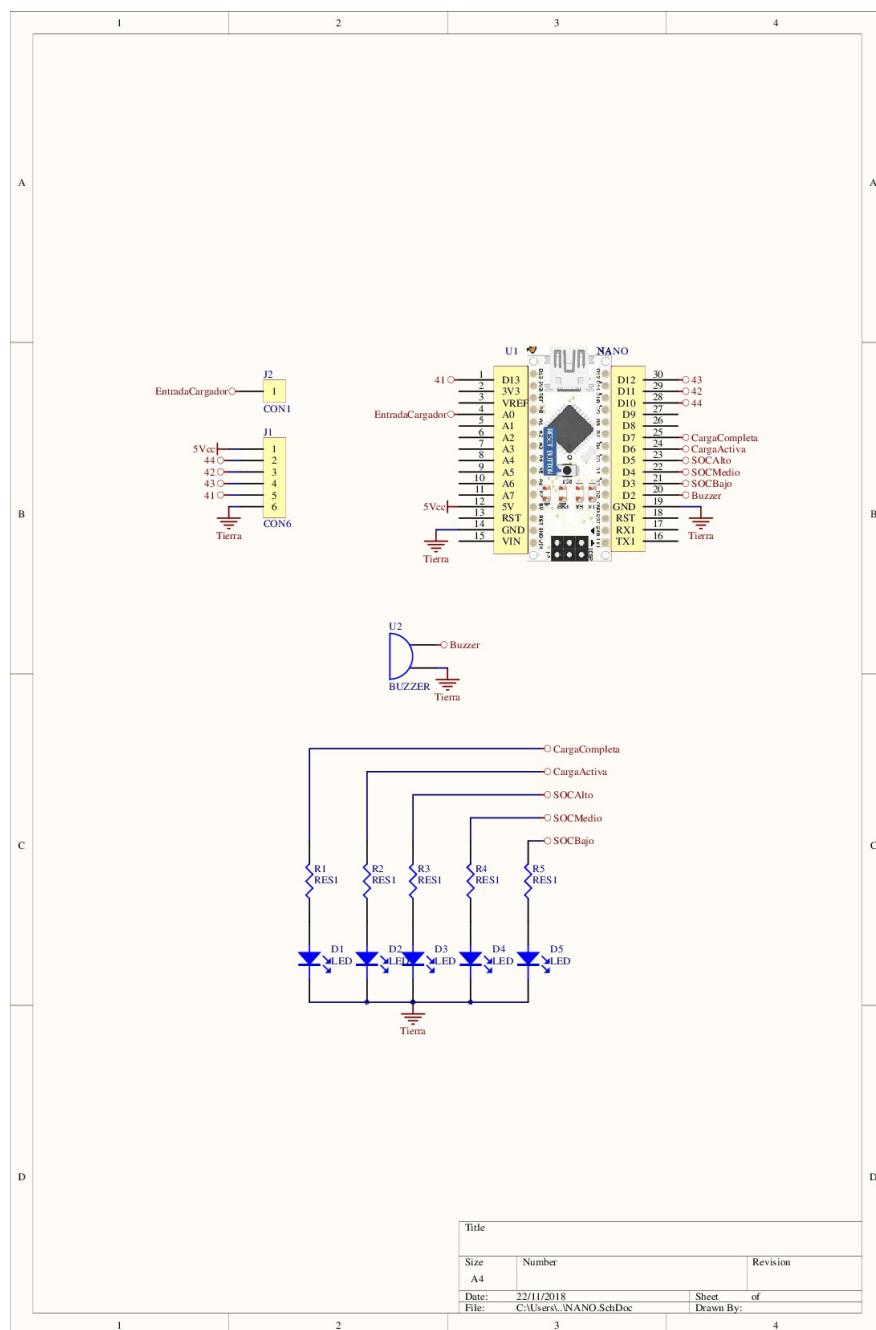


Figura C.7: Esquemático del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros  
Fuente: Autores

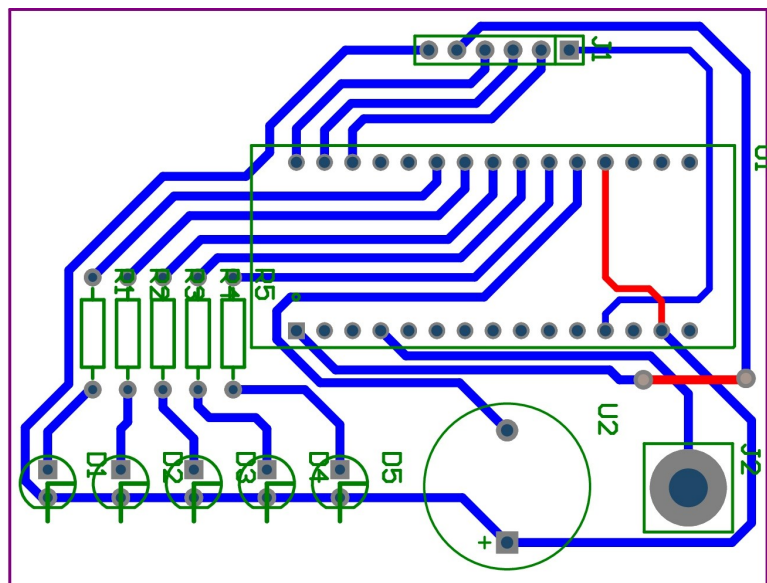


Figura C.8: Diseño del PCB del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros  
Fuente: Autores

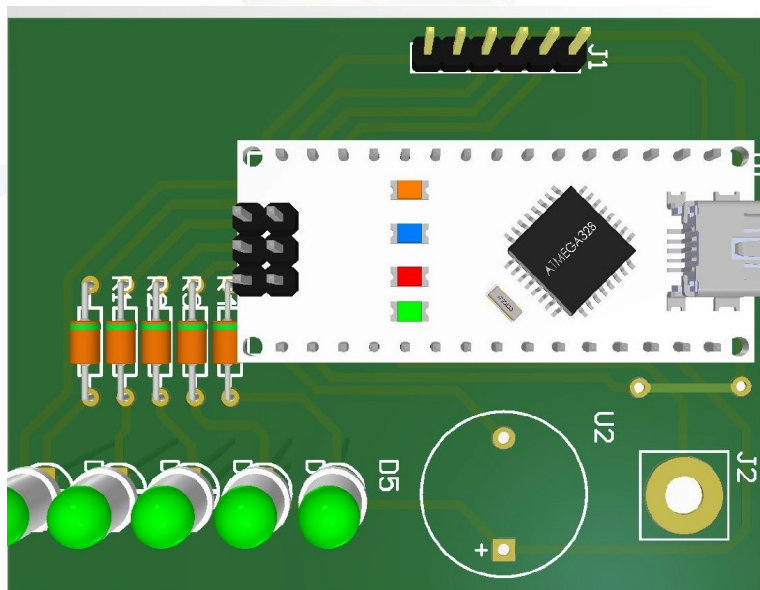


Figura C.9: Diseño del PCB en 3D del circuito del microcontrolador e indicadores visuales y sonoros  
Fuente: Autores

## C.4. Esquemáticos y PCB del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada

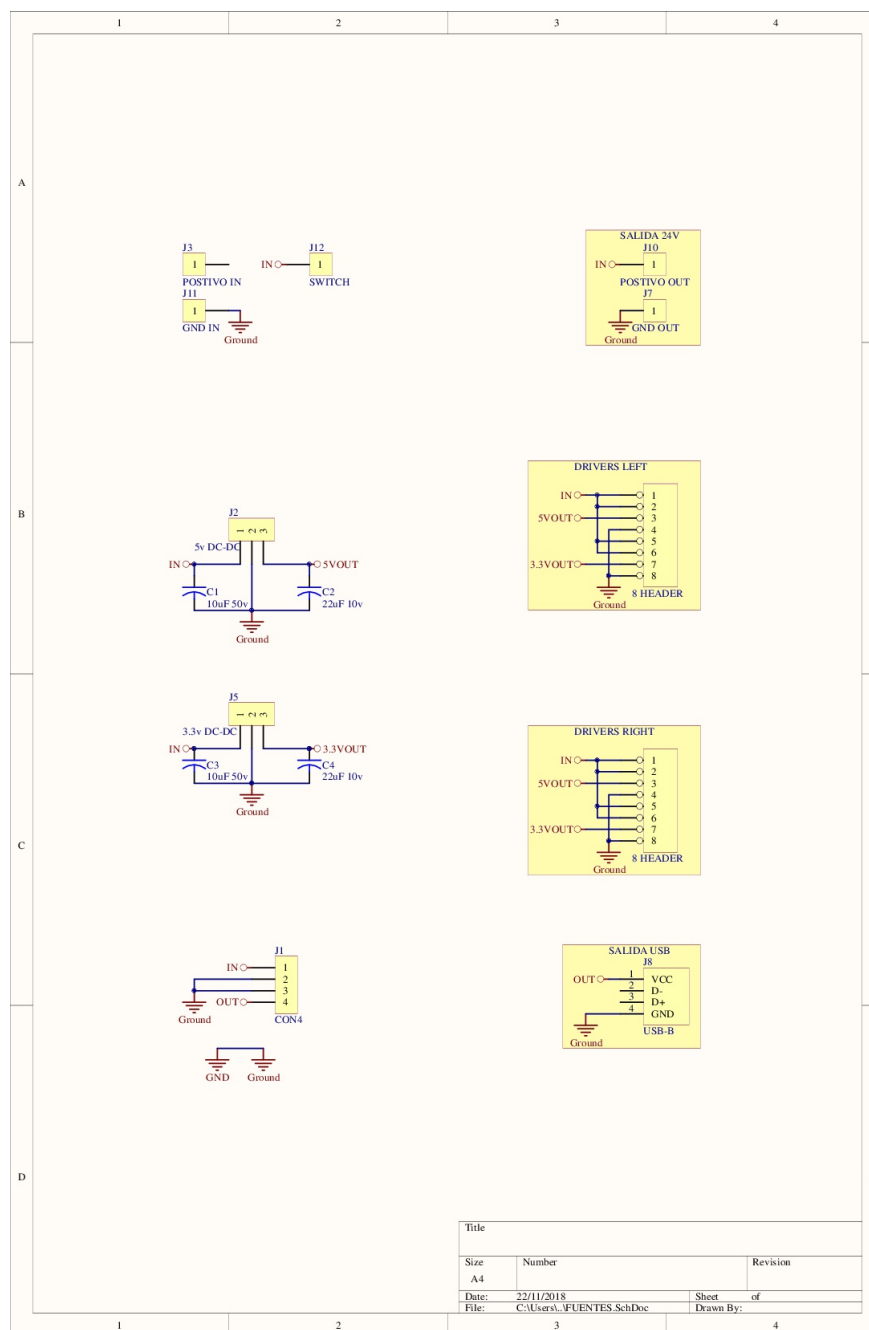


Figura C.10: Esquemático del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada  
Fuente: Autores

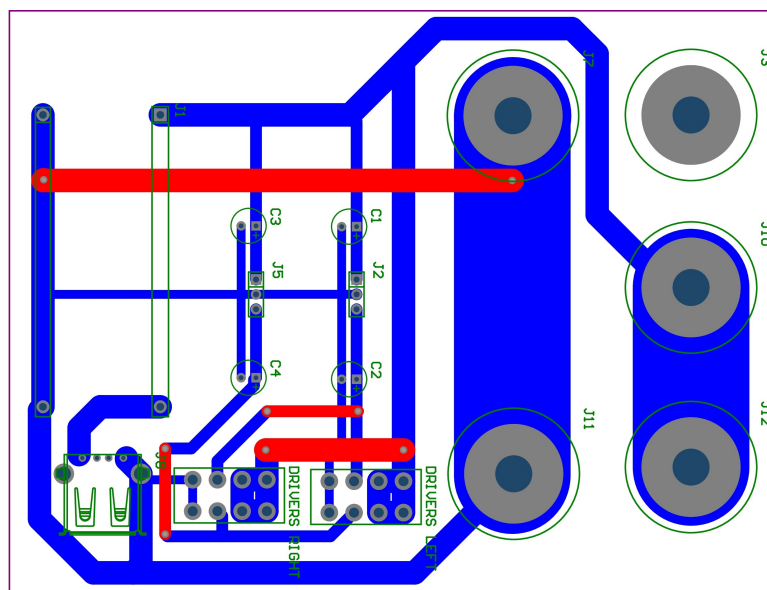


Figura C.11: Diseño del PCB del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada

Fuente: Autores

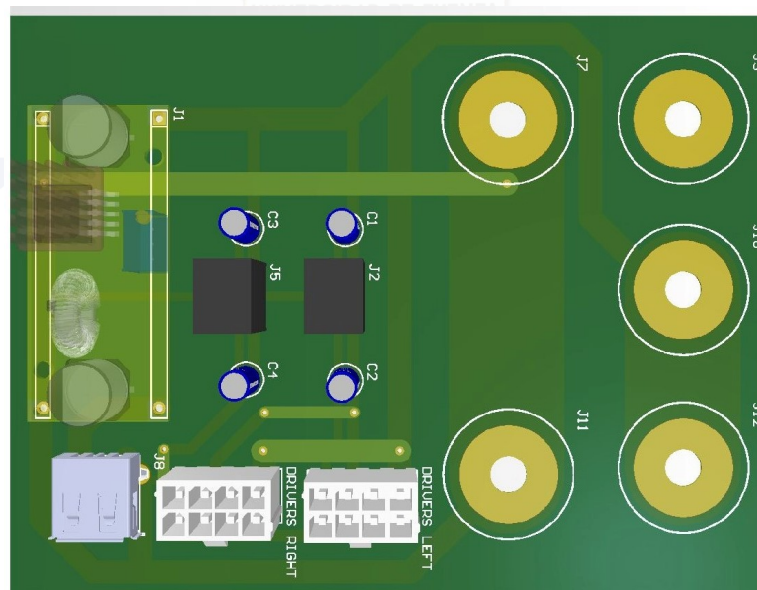


Figura C.12: Diseño del PCB en 3D del circuito de alimentación para los drivers y la electrónica asociada

Fuente: Autores



## C.5. Esquemáticos y PCB del circuito final

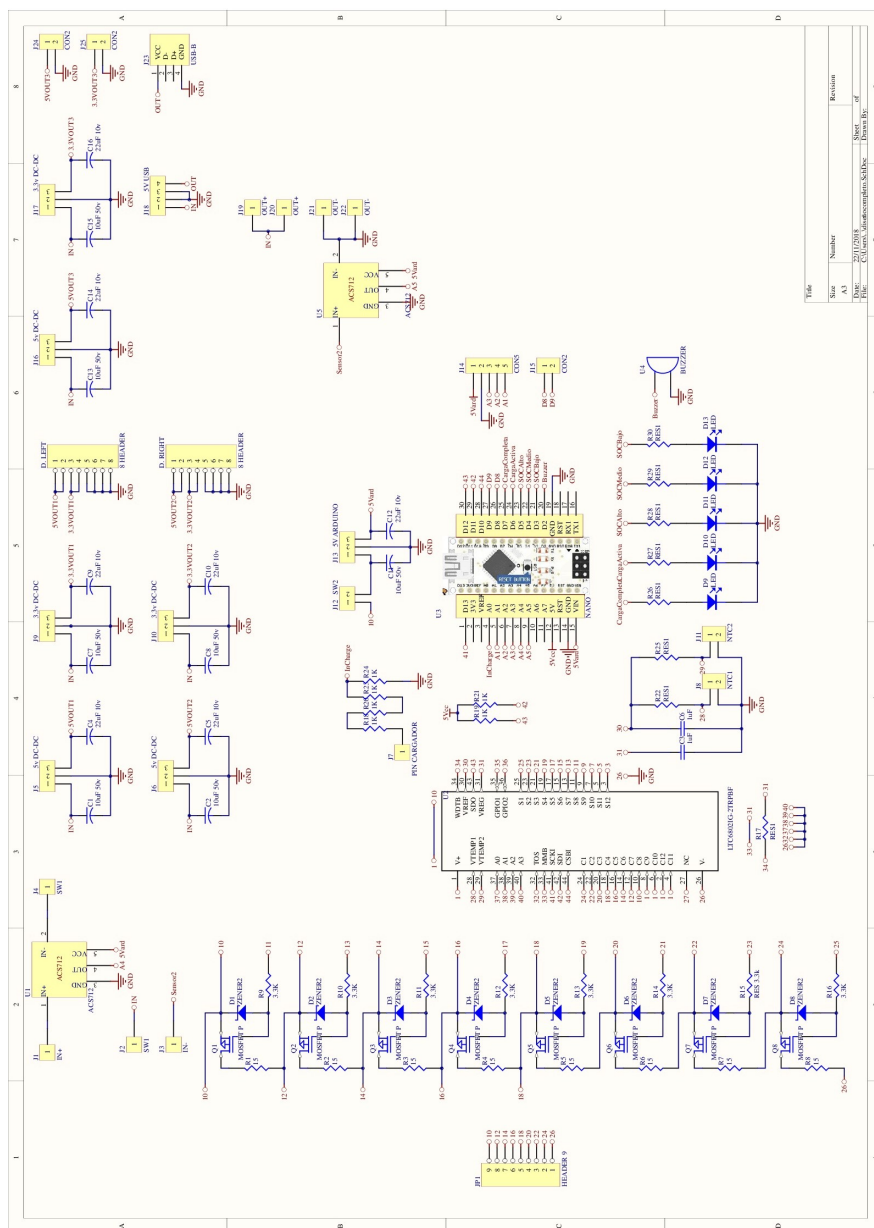
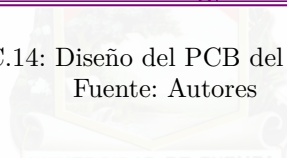


Figura C.13: Esquemático del circuito final

Fuente: Autores



THE UNIVERSITY OF CHICAGO



Fuente: Autores

## Anexo D

# Prototipos del Sistema de Gestión de Energía

Para realizar las pruebas de los circuitos a utilizar se construyeron varios [PCB](#) de prueba por separado, como se indica en el Anexo [C](#), para garantizar el funcionamiento de cada etapa del sistema de gestión de energía propuesto. Para el diseño tanto de los circuitos esquemáticos como [PCB](#) se utiliza el software Altium Designer.

### D.1. Primer Prototipo

A continuación se describe el primer prototipo realizado:

- Circuito del LTC6802-2: Es la placa que permite conectar las celdas a los pines  $C_i$  de medición de voltajes, resistencias y transistores para el balanceo, y diversos componentes electrónicos necesarios para el correcto funcionamiento de este [CI](#).
- Circuito de Balanceo: Circuito que consta de resistencias, transistores y diodos encargados de realizar el balance externo de las celdas según lo indique el pin  $S_i$  del LTC6802-2.
- Circuito de Comunicación y Censado de Temperatura: Encargado de comunicar el LTC6802-2 con el microcontrolador.
- Circuito de los DC-DC: Contiene los conversores [DC- DC](#) y la electrónica necesaria para su funcionamiento, así como los puertos para los componentes del exoesqueleto.
- Algoritmos del microcontrolador: son los diferentes algoritmos a implementarse en el microcontrolador, de tal forma que envíe los comandos correctos al [CI](#) LTC6802-2, para

luego enviar la información recibida al raspberry.

En los siguientes puntos se detalla cada una de estas partes que conforman el primer prototipo.

#### D.1.1. Circuito del CI LTC6802-2

Debido al empaquetamiento en el que es comercializado el CI LTC 6802-2, se construyó un PCB que permita la manipulación del mismo y la adaptación con los demás PCB de prueba. Este PCB se presenta en la Figura D.1, el cual está formado por el CI antes mencionado y peinetas tipo macho para la colocación de borneras o en un protoboard.

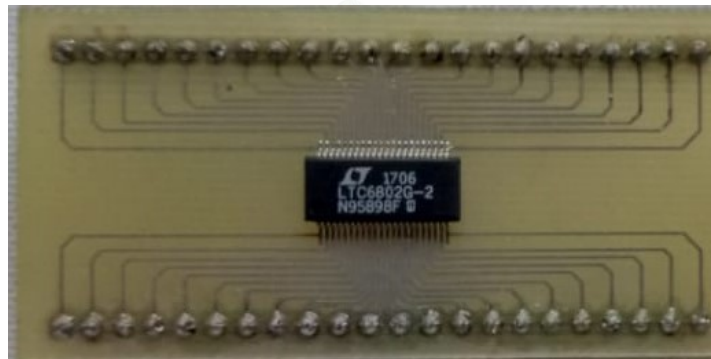


Figura D.1: PCB para el CI LTC6802-2  
Fuente: Autores

#### D.1.2. Circuito de Balanceo

Para el circuito de balanceo o de ecualización de celdas se utiliza un circuito de balanceo pasivo mediante resistencias conmutadas, este circuito es el recomendado por la data técnica del CI LTC6802-2. En la Figura D.2 se indica el circuito utilizado para un balanceo externo.

La data técnica recomienda que la resistencia de descarga para celdas de ion de litio tenga un valor entre 10 a 20  $\Omega$ , por lo que se utiliza una resistencia de 15  $\Omega$ ; la cual al ser mucho mayor que la resistencia interna de la celda, evita que alcance temperaturas elevadas al momento del balanceo de las celdas.

El diodo Zener sirve de protección ante un sobrevoltaje que se pueda dar en la parte de balanceo, este evita daños en los pines del CI LTC6802-2.

Para la conmutación de la resistencia se utiliza un transistor Mosfet tipo P, el cual es activo en

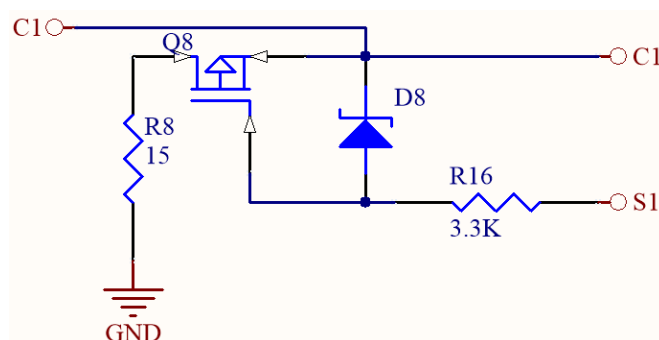


Figura D.2: Circuito de balanceo pasivo mediante resistencia conmutable  
Fuente: Autores

bajo, es activado mediante el pin  $S_n$  ( $n=1, 2, 3...12$ ) del CI LTC6802-2.

El circuito de balanceo utilizado para el banco de baterías junto con el PCB se muestra en C.1.

El PCB fabricado se presenta en la Figura D.3.

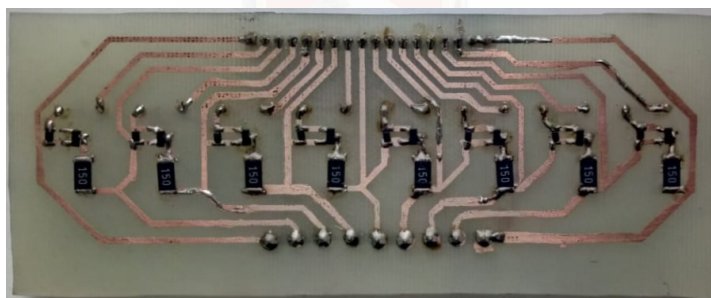


Figura D.3: PCB para el balanceo externo de las celdas  
Fuente: Autores

### D.1.3. Circuito de Comunicación y Monitoreo de temperatura

Se diseñó un PCB, indicado en C.2, el cual mediante conectores tipo peineta hembra se acople el CI LTC6802-2 y el circuito de balanceo, mencionado en D.1.2, adicionalmente, en este PCB se tiene los pines de salida para la comunicación SPI del CI hacia el microcontrolador. Este circuito se observa en la Figura D.4

Para el monitoreo de temperatura se utiliza un divisor de tensión compuesto por una resistencia y el termistor ntc mencionado en 3.6.1. El PCB construido para este circuito se presenta en la Figura D.5.

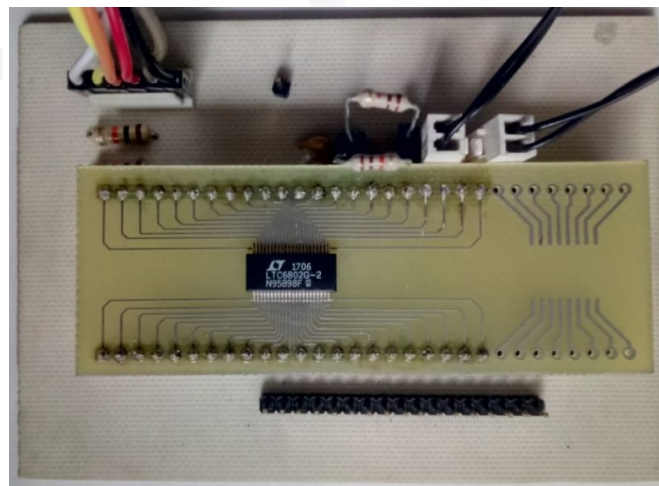
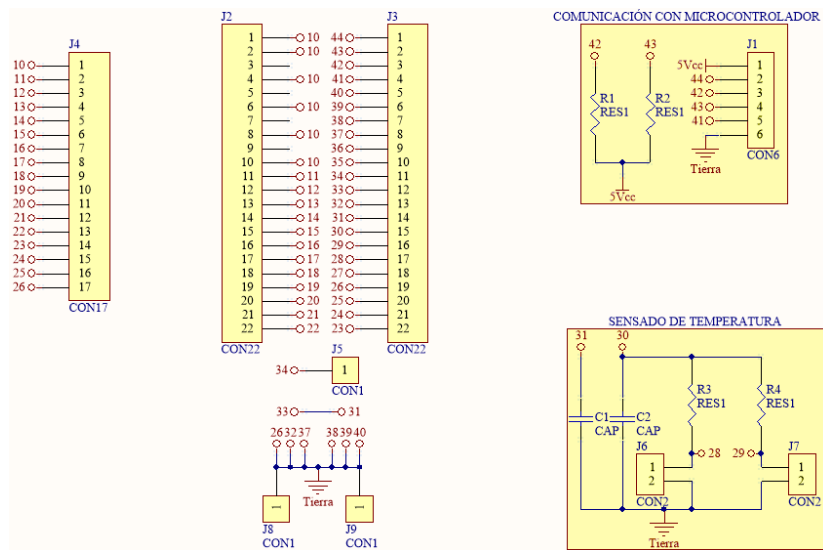


Figura D.5: PCB para la comunicación y monitoreo de temperatura

## D.2. Algoritmos del microcontrolador

Se requiere de una configuración inicial del integrado LTC6802-2 para poder recibir medidas de voltaje y temperatura. Para realizar esta configuración es necesario una comunicación entre el microcontrolador y el integrado BMS implementando una interfaz SPI, ya que este es el único tipo de comunicación aceptado por el integrado BMS [4].

Es necesaria la creación de un algoritmo para el microcontrolador que permita enviar o recibir los comandos y registros del LTC6802-2 indicados en la sección 4.2.6.

### A Algoritmo de Comunicación con el integrado LTC6802-2

El primer punto en este algoritmo consiste en activar la comunicación SPI, para ello se debe incluir la librería SPI en Arduino, esto se hace a través del comando "SPI.h", luego, en el bucle setup se debe configurar los parámetros de la comunicación como son: el modo SPI, la velocidad de reloj y el orden de transmisión de los bits, todo esto se logra con los siguientes comandos:

- `SPI.setBitOrder(MSBFIRST)`; configura el orden de transmisión de los bits, en este caso el MSB primero.
- `SPI.setDataMode(SPI_MODE3)`; define el modo SPI, en este caso el modo 3 (`CPOL = 1` y `CPHA = 1`)
- `SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16)`; divide la velocidad del reloj, en este caso al usar un cristal de 16 MHz, se divide para 16 obteniendo una velocidad de reloj de 1 MHz.

Se debe además configurar los correspondientes 4 pines necesarios para la interfaz SPI. En Arduino estos pines son el 10, 11, 12 y 13, los cuales representan los pines: SS, MOSI, MISO y SCLK (SCK) respectivamente, los pines se indican en la Figura D.6. Estos pines se configuran con los siguientes comandos:

- `pinMode(10, OUTPUT)`; configura el pin 10 como un pin de salida.
- `pinMode(11, OUTPUT)`; configura el pin 11 como un pin de salida.
- `pinMode(12, INPUT)`; configura el pin 12 como un pin de entrada.
- `pinMode(13, OUTPUT)`; configura el pin 13 como pin de salida.

La activación de la comunicación se realiza con el comando `SPI.begin()`;

El siguiente punto consiste en seleccionar los comandos a usar y crear las variables correspondientes en el algoritmo, estas se observan en el Algoritmo D.1, se debe notar que se les asignó el mismo nombre de la Tabla 4.2.6 para identificarlos adecuadamente.



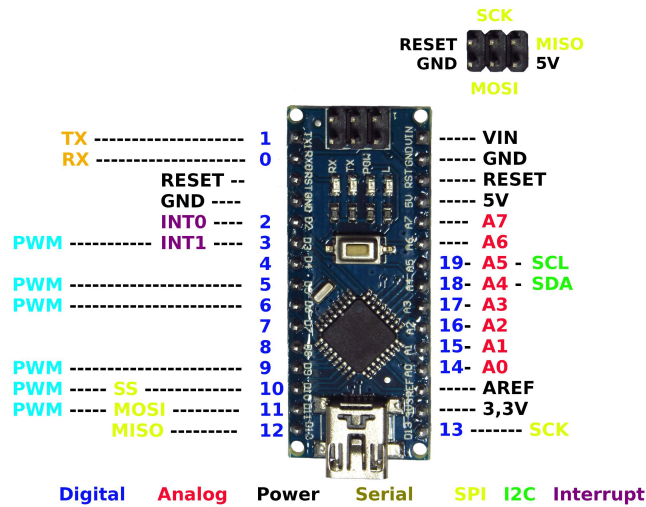


Figura D.6: Distribución de pines en un Arduino Nano  
Fuente: [18]

```

1 // #####
2 //      COMANDOS DEL INTEGRADO LTC6802-2
3 // #####
4
5 #define WRCFG 0x01    // Comando de escritura de registros de configuracion
6 #define RDCFG 0x02    // Comando de lectura de registros de configuracion
7 #define RDCV 0x04     // Comando de lectura registros de voltaje de celdas
8 #define STCVAD 0x10   // Comando de inicio de conversion ADC (voltaje)
9 #define RDTMP 0x08    // Comando de lectura de registros de temperatura
10 #define STTMPAD 0x30  // Comando de inicio de converiosn ADC (temperatura)
11 #define ID_CHIP 0x80  // ID del integrado LCT6802-2

```

Algoritmo D.1: Comandos utilizados para configuración y lectura de registros

Seleccionados los diferentes comandos a usar, el siguiente paso consiste en crear funciones que permitan: configurar el integrado BMS (escribir registros), leer los registros que se han enviado, leer los voltajes de las celdas, leer la temperatura de los termistores y realizar el balanceo de celdas.

La primera función a crearse consiste en escribir los comandos de configuración del CI LTC6802-2, para ello se toma como guía el ejemplo de la sección 4.2.6. Se sigue los siguientes pasos:

1. Colocar en bajo el pin CSBI del integrado LTC6802-2, esto se logra colocando en bajo el pin SS del Arduino a través del comando `digitalWrite(10, LOW);`



2. Enviar la **ID** del integrado **BMS**, en este caso es 1000 0000 o 80 en hexadecimal. Esto se logra con el comando `SPI.transfer(esclavo);` en donde esclavo contiene el **ID** del integrado.
3. Enviar el comando **WRCFG**, el cual indica que se desea escribir los registros de configuración. Para eso se emplea el comando `SPI.transfer(WRCFG);`
4. El último paso consiste en enviar los registros **CFGR0**, **CFGR1**,...**CFGR5**, usando el comando `SPI.transfer();` en el cual se debe colocar el valor en hexadecimal de cada uno de estos registros.

El Algoritmo D.2 presenta la función para la configuración de registros.

```
// #####  
2 //      FUNCION DE ESCRITURA DE REGISTROS DE CONFIGURACION  
// #####  
4  
6 void ConfReg()  
6 {  
8     Serial.println("Escribiendo registros....");  
8     digitalWrite(10, LOW); // Coloca en low el pin CSBI  
8     SPI.transfer(ID_CHIP); // Indica el chip a escribir, en este caso el  
    0000  
10    SPI.transfer(WRCFG); // Comando para escribir configuracion  
  
12    // Desde aqui se escriben los respectivos registros  
12    SPI.transfer(0x81); // Manda 1000 0001 al registro CFGR0  
14  
14    SPI.transfer(CFGR1); // Manda el registro CFGR1  
16  
16    SPI.transfer(0x00); // Manda 0000 0000 al registro CFGR2  
18  
18    SPI.transfer(0x00); // Manda 0000 0000 al registro CFGR3  
20  
20    SPI.transfer(0x75); // Manda 0111 0001 al registro CFGR4  
22  
22    SPI.transfer(0xAB); // Manda 1010 1011 al registro CFGR5  
24    digitalWrite(10, HIGH); // Indica que se termino de enviar, coloca en  
    high el pin CSBI  
}
```

Algoritmo D.2: Función de Configuración de Registros

Una vez que se han enviado los bytes de registro, es necesario verificar que el integrado LTC6202-2 haya quedado configurado tal cual indica la función de escritura. Para ello se creó una función de lectura de registros, la cual siguiendo los pasos del ejemplo de la sección 4.2.6, de la siguiente manera:

1. Se crea un variable de tipo byte para almacenar la lectura de cada registro. Esta

- variable se crea usando el comando `byte byteLectura` ;
2. Colocar en bajo el pin CSBI del integrado [BMS](#)
3. Enviar la [ID](#) del esclavo
4. Enviar el comando `RDCFG`, el cual indica al integrado [BMS](#) que se desea leer los registros de configuración. Se usa el comando `SPI.transfer(RDCFG)`;
5. Mediante un bucle `for` se lee cada uno de los registros de configuración y se almacenan en la variable `byteLectura` .
6. Se envía por comunicación Serial [RS232](#) el valor recibido, y se procede a leer el siguiente dato.
7. Al finalizar la lectura se coloca de nuevo el pin CSBI en alto.

Esta función de lectura de registros se presenta en el Algoritmo [D.3](#)

```
//#####  
2 //      FUNCION DE LECTURA DE REGISTROS  
//#####  
4  
6 void LecturaReg() {  
8     byte Lecturas; // variable que almacena los registros leidos  
    Serial.println("Leyendo registros...");  
    digitalWrite(10, LOW); // Coloca en low el pin CSBI  
    SPI.transfer(ID_CHIP); // Indica el dispositivo esclavo  
10    SPI.transfer(RDCFG); // Comando para indicar lectura  
    for (int i = 0; i < 6; i++) // Se lee los registros de configuracion  
12    {  
        Lecturas = SPI.transfer(RDCFG);  
14        Serial.println(Lecturas, HEX);  
        delay(80);  
16    }  
    digitalWrite(10, HIGH);  
18    Serial.println("*****");  
    ConfReg();  
20 }
```

Algoritmo D.3: Función Prototipo de Lectura de Registros

## B. Función de Lectura de Temperatura

La lectura de la temperatura, dada por los termistores, se realiza a través de 2 funciones: una función que lee los registros del integrado LTC6802-2 y otra función que transforma esta lectura en grados Celsius, esto se hace debido a que las lecturas en sí no son datos de temperatura sino datos de Voltaje aplicados a los pines `VTEMP1` y `VTEMP2` en base a los termistores conectados a estos, dado que el termistor es una resistencia que varía de acuerdo con la temperatura, entregando un voltaje diferente por cada grado Celsius, por lo tanto, es necesario conocer la curva característica de temperatura vs voltaje del termistor.

El esquema de conexión del termistor al CI LTC6802-2 se muestra en la Figura D.7.

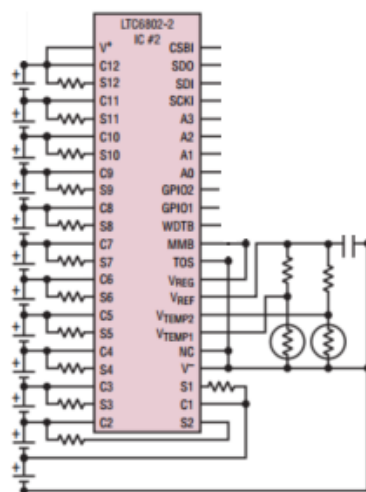


Figura D.7: Esquema de conexión de los termistores al LTC6802-2

Fuente: [4]

En el esquema de la Figura anterior se observa una resistencia conectada en serie para cada termistor, a su vez esta resistencia se conecta al pin VREF, el cual entrega un voltaje de aproximadamente 3.075 V, luego los termistores se conectan a los pines VTEMP1 y VTEMP2. De esta forma se crea un partidor de tensión con lo cual, según el valor de la resistencia del termistor, el pin VTEMPx recibirá un voltaje de entre 0 a 3.075 V. Por lo tanto, en base al voltaje medido en VTEMP1 y VTEMP2 se determina la temperatura medida por los termistores.

La lectura de los voltajes en VTEMP se basa en la secuencia del ejemplo de la sección 4.2.6.

1. Crear una variable para almacenar los datos de los registros, en nuestro caso es un vector del tipo byte denominado temperaturas;
2. Crear una variable para obtener el voltaje medido, estas son 2 variables de tipo float, ya que son valores con decimales, float voltaje1; y float voltaje2;
3. Colocar en bajo el pin CSBI
4. Enviar el comando STMPAD, el cual indica que se desean leer los registros de temperatura.
5. Realizar una pausa de al menos 12 ms.
6. Enviar la ID del dispositivo esclavo
7. Enviar el registro RDTMP, para indicar que el integrado envíe los registros de temperatura.

8. Mediante un bucle `for` leer los datos de los registros y almacenarlos en la variable temperaturas.
9. Colocar en alto el pin CSBI
10. Transformar los datos de cada registro, tomando los 8 primeros bits como los más significativos del registro `TMPR0` y los 4 bits menos significativos del registro `TMPR1`, para formar un dato de 12 bits que representa el voltaje en `VTEMP1`.
11. Tomar los 4 bits más significativos del registro `TMPR1` y los 8 bits del registro `TMPR2` para formar un dato de 12 bits que representa el voltaje en `VTEMP2`.
12. Usar los datos obtenidos en el punto anterior en la ecuación D.1, para obtener el valor real del voltaje en `VTEMPx`.

$$VTEMP_X = Datos_{12bits} * 1,5mV \quad (D.1)$$

13. Almacenar este valor en una de las variables `voltajex`.

Con esto se determina el valor del voltaje en cada pin `VTEMPx`, sin embargo, este voltaje no es directamente proporcional a la temperatura, por lo tanto, es necesaria una función que determine la temperatura en base al voltaje medido. Para esto se debe conocer el valor de la resistencia del termistor que produce cada valor de voltaje.

En el Anexo B.1 se incluye el proceso para determinar las ecuaciones mediante las cuales, según el voltaje que se mida en el pin `VTEMPx`, se determine el valor de temperatura.

Dada la calibración de los termistores, se procede a programar las ecuaciones dadas en el Anexo B.1 dentro del microcontrolador. El primer paso es crear las variables, estas se observan en el Algoritmo D.4.

```
2 int yi = 50;
  float mmin = -37.0895;
4 float mmax = -37.0713;
  float ximin = 0.8909;
6 float ximax = 0.9152;
  float tmin;
8 float tmax;
}
```

Algoritmo D.4: Variables para la lectura de temperatura

El siguiente paso es crear la función que reciba como parámetro el voltaje medido, luego emplee las ecuaciones B.3 y B.4 del Anexo B.1 para obtener una temperatura media máxima y mínima, encuentre el promedio de estos valores, redondee al entero más cercano y retorne el valor de temperatura medido. Esta función se presenta en el Algoritmo D.5,

en donde se recibe el voltaje medido por uno de los pines VTEMPx y retorna la temperatura almacenada en la variable `valor_tempe`.

```
1 int Temperatura(float voltaje) {  
    int valor_temp;  
3   tmin = yi + mmin * (voltaje - xmin);  
   tmax = yi + mmax * (voltaje - xmax);  
5   valor_temp = round((tmin + tmax) / 2);  
   return valor_temp;
```

Algoritmo D.5: Función Prototipo de Medición de Temperatura

### C Algoritmo de Lectura de Voltajes y Balanceo de Celdas

La lectura de registros de voltajes de celda se realiza al igual que las demás, mediante la siguiente secuencia de pasos:

1. Crear una variable para almacenar los datos de los registros, en nuestro caso es un vector del tipo `byte` denominado `volt`.
2. Crear una variable para almacenar los voltajes medidos de cada celda, para nosotros es un vector del tipo `float` nombrado `voltajes`.
3. Colocar en bajo el pin CSBI
4. Enviar el comando `STCVAD`, el cual indica que se desean leer los registros de voltaje.
5. Realizar una pausa de al menos 12 ms.
6. Enviar la `ID` del dispositivo esclavo.
7. Enviar el comando `RDCV`, que indica al integrado `BMS` que envíe los registros de voltaje.
8. Mediante un bucle `for` leer los registros que contienen los datos del voltaje de las celdas.
9. Almacenar los datos de los registros en la variable `volt`. colocar en alto el pin CSBI.
10. Transformar los datos de la variable `volt` en valores reales de medición, teniendo en cuenta que cada valor de voltaje está dado por un dato de 12 bits, los cuales se almacenan 8 en el registro  $Cx_iV$  y los 4 restantes en el registro  $Cx_{i+1}V$  o  $Cx_{i-1}V$ . Usar la ecuación D.2 para obtener el valor real de cada celda.

$$Celda_x = Datos_{12bits} * 1,5mV \quad (D.2)$$

11. Almacenar el valor de cada celda en la variable `voltajes`.

De esta forma se leen los voltajes que contienen cada celda, sin embargo, aún es necesario realizar el balanceo de cargas.

El Algoritmo D.6 muestra la función de lectura de voltajes y el proceso para convertir los datos recibidos en un valor de voltaje real.

```
2 void LeerVoltajes() {
4     digitalWrite(10, LOW);
      SPI.transfer(STCVAD);
6     delay(20);
      digitalWrite(10, HIGH);
8     byte volt[18];
      digitalWrite(10, LOW);
10    SPI.transfer(ID);
      SPI.transfer(RDCV);
12    for (int j = 0; j < 18; j++)
        {
14        volt[j] = SPI.transfer(RDCV);
        }
16    digitalWrite(10, HIGH);
      float voltajes[8];
18    voltajes[0] = (((volt[0] & 0xFF) | (volt[1] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);
      voltajes[1] = (((volt[1] & 0xF0) >> 4 | (volt[2] & 0xFF) << 4) * 1.5 *
          0.001);
20    voltajes[2] = (((volt[3] & 0xFF) | (volt[4] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);
      voltajes[3] = (((volt[4] & 0xF0) >> 4 | (volt[5] & 0xFF) << 4) * 1.5 *
          0.001);
22    voltajes[4] = (((volt[6] & 0xFF) | (volt[7] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);
      voltajes[5] = (((volt[7] & 0xF0) >> 4 | (volt[8] & 0xFF) << 4) * 1.5 *
          0.001);
24    voltajes[6] = (((volt[9] & 0xFF) | (volt[10] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001)
        ;
      voltajes[7] = (((volt[10] & 0xF0) >> 4 | (volt[11] & 0xFF) << 4) * 1.5 *
          0.001);
26    delay(100);
}
```

Algoritmo D.6: Función Prototipo de Lectura de Voltajes

El balanceo de cargas se realiza en función de los voltajes medidos anteriormente, es necesario identificar la celda con el menor voltaje, para así, igualar todas las demás celdas a esta a través del balanceo pasivo.

Identificada la celda con menor voltaje lo siguiente es ir celda por celda comparando su valor con el mínimo obtenido, y si resulta ser mayor a un margen de aceptación, entonces se procede a colocar en 1 el bit correspondiente a esta celda dentro del registro CFGR1, el cual es el registro que enciende (bit en 1) o paga (bit en 0) el balanceo de las 8 primeras celdas conectadas al integrado [BMS](#), cada celda se identifica como uno de los bits del registro CFGR1. En vista a que este registro debe mantenerse cada vez que se envían a escribir los datos de configuración, se creó una variable global `byte CFGR1`; cuyo valor

cambia únicamente en la función de balanceo.

Por otro lado, si el valor de la celda ya no es mayor al margen de aceptación, se procede a apagar el balanceo de esta celda.

El motivo de escoger un rango de aceptación es debido a los errores que podrían presentarse al medir el voltaje de las celdas, ya que, si tomamos como condición que el voltaje de una celda debe ser mayor al voltaje mínimo, podría darse que el voltaje de esta celda se disminuya demasiado y ahora este pase a ser la celda con menor voltaje y así el balanceo nunca se detendría. El rango que se tomó, en primer lugar, de 0.03 V, es decir si una celda tiene un voltaje mayor que la celda mínima aumentado 0.03 V, se continúa balanceando, caso contrario se apaga el balanceo de la celda.

```
2 void balanceo(float vector[8]) {
    CFGR1 = 0x00;
4   float mini = 10.2;
    int indice = 0;
6   float diferencia = 0;
    // Se obtiene el voltaje minimo
8   for (int i = 0; i < 8; i++) {
        if (vector[i] < mini) {
10            mini = vector[i];
            indice = i;
12        }
    }
14   Serial.println("El minimo es: " + String(mini));
    // Se compara voltaje por voltaje
16   for (int i = 0; i < 8; i++) {
        diferencia = vector[i] - mini;
18        if (diferencia > 0.03) {
            CFGR1 += 0x01 << (i);
20            Serial.println("La celda a balancear es: " + String(i + 1) + ", con
            valor: " + String(vector[i]));
        }
22        else {
            CFGR1 += 0x00 << (i);
24        }
    }
26 }
```

Algoritmo D.7: Función Prototipo de Balanceo de Celdas

### D.3. Resultados del Primer Prototipo

En la Figura D.8 se presenta el primer prototipo armando con todos los circuitos descritos anteriormente, este circuito será el encargado de comunicarse con el microcontrolador.

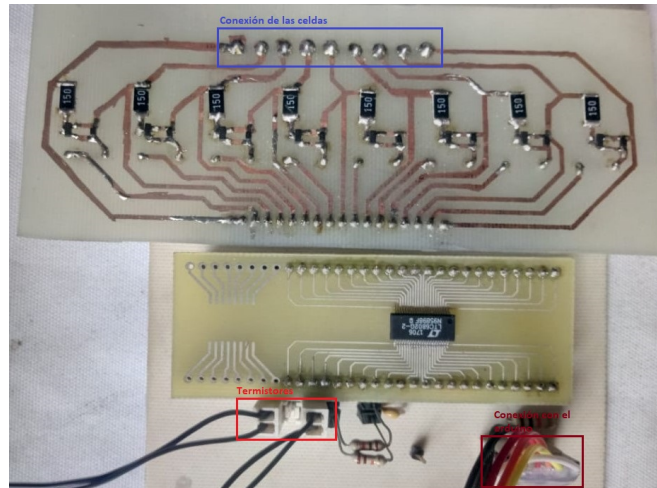


Figura D.8: Primer Prototipo del sistema de gestión de energía

#### D.3.1. Comprobación de la comunicación entre el microcontrolador y el integrado LTC6802-2

Como primer punto se procede a comprobar el algoritmo de escritura de registros, ya que con esto se determinará si la comunicación entre el microcontrolador y el integrado BMS se lleva a cabo o no.

Para ello se cargó en el microcontrolador las funciones de escritura y lectura de registros, indicando los parámetros de configuración de la Tabla D.1.

El siguiente paso es conectar el microcontrolador a la placa del integrado BMS para comenzar a configurar y leer los registros. En la Figura D.9 se presenta el resultado de la lectura de los registros indicados en la D.1, con lo que se concluye que la comunicación es un éxito.



Tabla D.1: Valores cargar en los registros del LTC6802-2

Registro	Valor (hexadecimal)	Descripción
CFGR0	81	Se coloca un valor diferente de 0 para indicar al integrado que salga del modo stand by, apaga el watchdog timer, indica que se medirán menos de 12 celdas, activa los pines GPIO <sub>x</sub> como GND.
CFGR1	0	Desactiva el balanceo de las 8 primeras celdas.
CFGR2	0	Desactiva el balanceo de las 4 últimas celdas, desactiva las interrupciones por banderas de las 4 primeras celdas.
CFGR3	0	Desactiva las interrupciones por banderas de las 8 últimas celdas.
CFGR4	7D	Indica el valor mínimo de voltaje de cada celda, en este caso 3 V.
CFGR5	AB	Indica el valor máximo de voltaje de cada celda, en este caso 4,1 V.

```
-----  
Escribiendo registros...  
Leyendo registros...  
1  
0  
0  
0  
7D  
AB  
-----
```

Figura D.9: Prueba de escritura y lectura registros

Fuente: Autores

### D.3.2. Lectura de Voltajes y Temperaturas

Una vez comprobada la comunicación entre los dispositivos se procedió a medir los voltajes de las celdas y a obtener las medidas de temperatura dadas por los termistores.

Se agregan las funciones de lectura de registros de voltajes y lectura de registro de celdas y se quita la función de lectura de registros de configuración ya que esta no es necesaria.

En la Figura D.10(a) a) se observa el resultado de la medición de voltajes y temperaturas, se puede ver que la lectura de cada celda se realizó de forma exitosa, así como la lectura de temperaturas, sin embargo, para poder probar de mejor manera que las temperaturas calculadas son las correctas, se procedió a censar la temperatura corporal con uno de los termistores, esperando a que el valor de la temperatura se estabilice, dando como resultado  $36^{\circ}\text{C}$ , como se muestra en la Figura D.10(b), la cual es un temperatura aceptable, ya que la temperatura humana oscila entre los  $36.3$  a  $37.1^{\circ}\text{C}$ .

-----	-----
Escribiendo registros...	Escribiendo registros...
Voltaje de Celdas	Voltaje de Celdas
Celda 1: 3.57V	Celda 1: 3.57V
Celda 2: 3.58V	Celda 2: 3.58V
Celda 3: 3.59V	Celda 3: 3.59V
Celda 4: 3.59V	Celda 4: 3.59V
Celda 5: 3.59V	Celda 5: 3.59V
Celda 6: 3.58V	Celda 6: 3.58V
Celda 7: 3.56V	Celda 7: 3.56V
Celda 8: 3.54V	Celda 8: 3.54V
Escribiendo registros...	Escribiendo registros...
Temperatura 1: 24 °C	Temperatura 1: 24 °C
Temperatura 2: 25 °C	Temperatura 2: 36 °C

(a) Medición temperatura ambiente      (b) Medición de temperatura corporal

Figura D.10: Medición de voltajes y temperaturas

### D.3.3. Balanceo de celdas

Para el balanceo de las celdas se modificó el programa anterior, agregando la función de balanceo y configurando los valores de voltajes enviados por el microcontrolador para que entregue 3 decimales, esto con el objetivo de visualizar de mejor manera el balanceo, además se configuró un rango de balanceo, es decir la diferencia máxima permitida entre el voltaje de una celda y el voltaje mínimo, es de  $0.03\text{ V}$ .

En la función de balanceo se agregaron comandos que envían la información acerca de qué celda se está balanceando, cual es el voltaje mínimo del banco de baterías y el valor que tendrá el registro CFGR1. En la Figura D.11, se presenta el resultado de la medición y balanceo con este algoritmo.

```
Escribiendo registros...
Voltaje de Celdas
Celda 1: 3.572V
Celda 2: 3.587V
Celda 3: 3.593V
Celda 4: 3.594V
Celda 5: 3.597V
Celda 6: 3.582V
Celda 7: 3.561V
Celda 8: 3.545V
El minimo es: 3.545V
La celda a balancear es: 2, con valor: 3.587
La celda a balancear es: 3, con valor: 3.593
La celda a balancear es: 4, con valor: 3.594
La celda a balancear es: 5, con valor: 3.597
La celda a balancear es: 6, con valor: 3.582
El valor del registro CFGR1 es: 111110 62
Escribiendo registros...
Temperatura 1: 24 °C
Temperatura 2: 25 °C
-----
```

Figura D.11: Resultado del algoritmo de balanceo

Fuente: Autores

Se observa que la celda 1 y 7 no se balancean, debido a que están dentro del rango, y además la celda 8 no se balancea pues esta es la que posee el voltaje mínimo.

Además, se comprobó que, en el circuito de balanceo, las resistencias de las celdas balanceándose disipan la energía en forma de calor, mientras que las resistencias de las celdas 1, 7 y 8 permanecían a temperatura ambiente.

Debido a la gran capacidad de las celdas (26 Ah) el balanceo de estas tomaría muchas horas en las cuales siempre se deben estar monitorizando los valores que toman dichas celdas, por esto se implementó un algoritmo que permita la comunicación a través de la interfaz serial [RS232](#) con el microcontrolador y una raspberry, de esta forma se almacena la información de los voltajes de las celdas. Este algoritmo registra los voltajes de las 8 celdas y la hora a la cual se realizó la captura y los almacena en un archivo .txt para su posterior análisis, la Figura [D.12](#) muestra la forma en que se almacenan estos datos dentro del archivo .txt.

El análisis de los datos se realiza en Matlab, mediante un script que lee el archivo .txt en el cual se han capturado los datos y genera las correspondientes gráficas de voltaje vs. tiempo o temperatura vs. tiempo.

La gráfica obtenida de este primer balanceo se observa en la Figura [D.13](#), en donde se puede apreciar como las celdas empiezan a disminuir su voltaje hasta entrar en la zona de no balanceo (limitada por la línea negra), se muestra además cómo las celdas 1, 7 y 8 permanecen constantes.

```
-----  
Hora de captura: 15:53:41  
Celda 1: 3.572V  
Celda 2: 3.582V  
Celda 3: 3.587V  
Celda 4: 3.590V  
Celda 5: 3.593V  
Celda 6: 3.576V  
Celda 7: 3.561V  
Celda 8: 3.545V  
Temperatura 1: 23 °C  
Temperatura 2: 23 °C  
-----
```

Figura D.12: Datos almacenados dentro del archivo .txt  
Fuente: Autores

Adicionalmente en la Figura D.13 se observa que las celdas 2 y 3 al entrar en el rango de no balanceo mantienen su voltaje, es decir dejaron de balancearse. Con esta prueba se determina que el rango de 0.03 V es apropiado para el balanceo y se propone disminuir este valor a 0.01 V.

Como prueba final del balanceo, se realiza una descarga de las celdas con el objetivo de desbalancear todo el banco de baterías. En la Tabla D.2 se presenta los valores a los que se redujo el voltaje de cada celda antes de realizar el balanceo.

Tabla D.2: Voltaje de las Celdas previo al balanceo

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.128	3.484	3.492	3.366	3.57	3.123	3.316	3.478

Fuente: Autores

El resultado del balanceo se muestra en la Figura D.14, en esta ocasión se dejó activo el sistema aproximadamente 37.5 horas. Se observa como las celdas tienden al voltaje de la celda 6, 3.125 V, hasta alcanzar un valor no mayor a 0.01 V con respecto a esta celda. En este caso la celda 1 no se balanceo ya que se encontraba dentro del rango de no balanceo. El balanceo se detuvo de forma automática a las 36 horas con 15 minutos. Se dejó que el sistema se estabilice por 1 horas y 15 minutos para obtener el resultado final.

Los voltajes obtenidos luego del balanceo se presentan en la Tabla D.3. Esta tabla incluye la diferencia de voltajes entre la celda  $C_i$  y la celda con menor voltaje (celda 6). Se observa que la diferencia es de 0.008 para todas las celdas que se balancearon, lo cual indica un funcionamiento

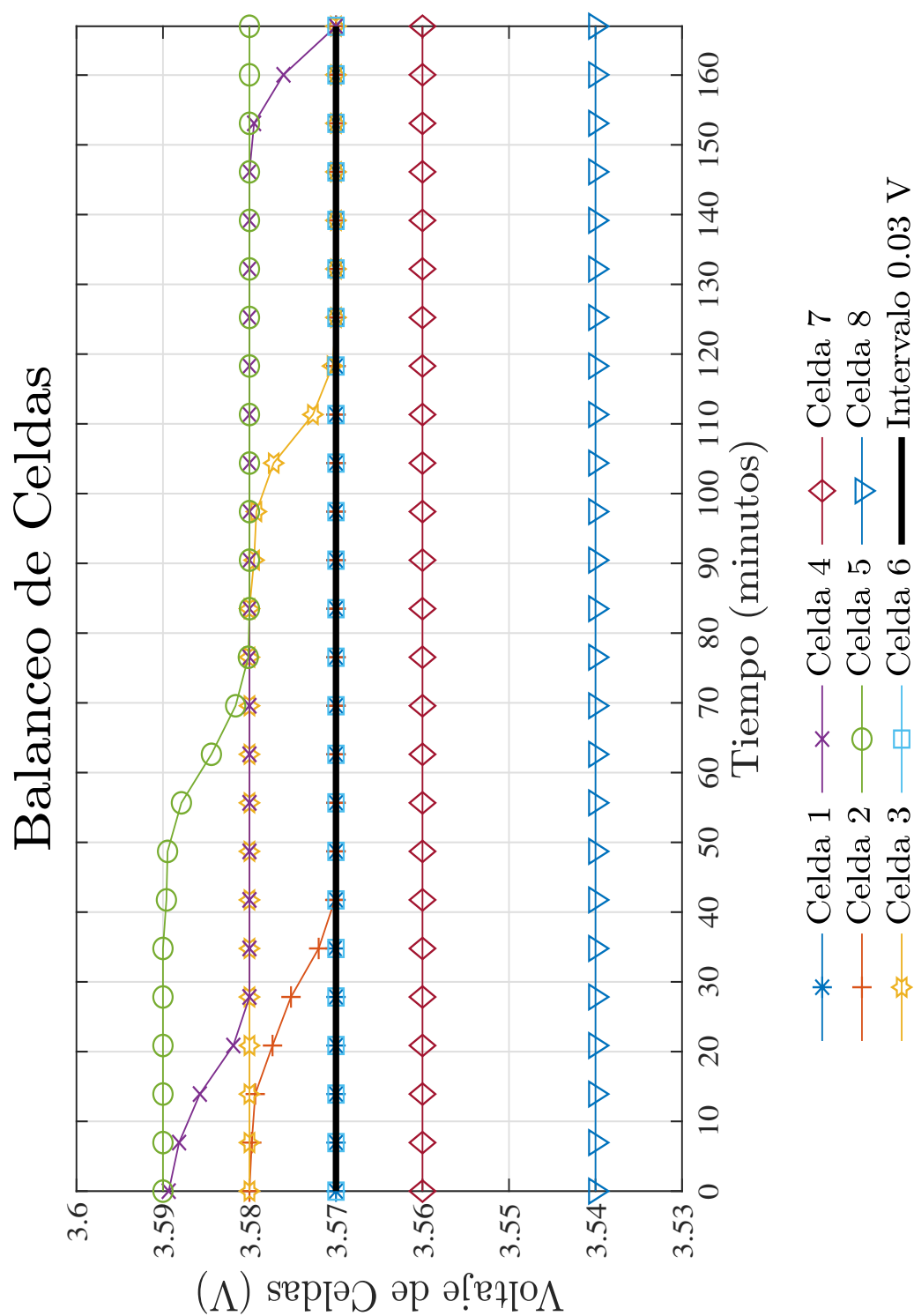


Figura D.13: Resultado del primer balanceo  
Fuente: Autores

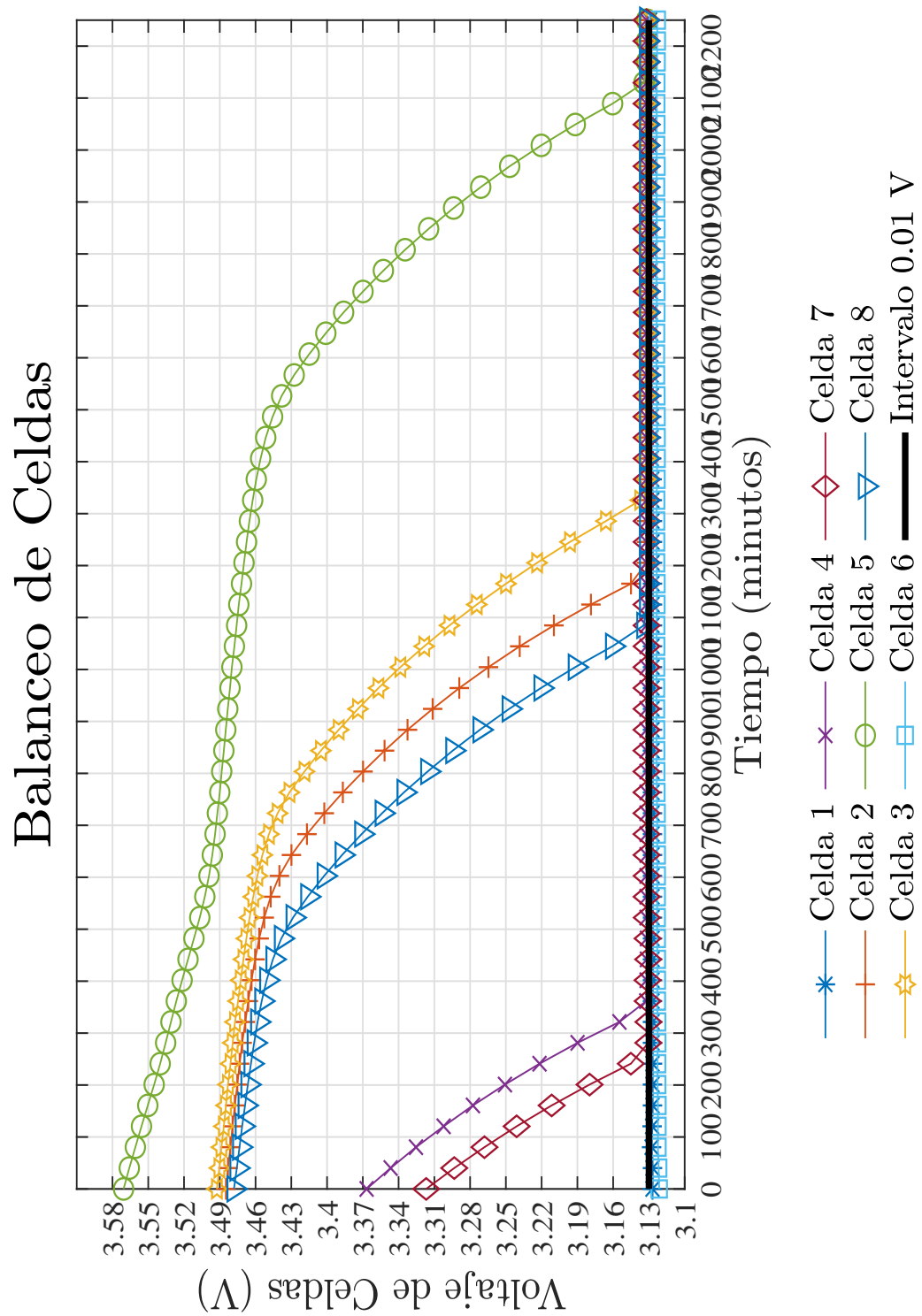


Figura D.14: Balanceo con celdas muy desequilibradas  
Fuente: Autores

correcto pues luego de tener una diferencia menor a 0.01 el balanceo se detuvo.

Tabla D.3: Voltaje de las Celdas luego del balanceo

Celda	Voltaje (V)	Diferencia con respecto a la celda de menor potencial (V)
1	3.128	0.005
2	3.132	0.009
3	3.132	0.009
4	3.132	0.009
5	3.132	0.009
6	3.123	0.009
7	3.132	0.009
8	3.132	0.009

Fuente: Autores

## D.4. Segundo Prototipo

De las pruebas del primer prototipo se pudo concluir que no es para nada recomendable dejar que las celdas sufran un gran desbalance, ya que para poder equilibrar sus voltajes tomará demasiado tiempo, además es necesario la implementación de una alarma visual y auditiva que permita conocer el estado de carga de las baterías ya sea durante su uso o durante la carga de las mismas. Estos se tomaron en cuenta para la creación de un segundo prototipo.

### D.4.1. Circuito con Leds y Buzzer

Debido a que la portabilidad del sistema es indispensable en el desarrollo de este proyecto, se diseñó un PCB indicado en C.3 que contenga el microcontrolador Arduino NANO junto con indicadores visuales y sonoros. Indicadores visuales: Se utilizan leds para diferentes estados del banco de baterías.

- Estado de carga bajo (menor al 30 % de la capacidad total).
- Estado de carga medio (entre el 70 % al 30 % de la capacidad total).
- Estado de carga alto (entre el 100 % al 80 % de la capacidad total).
- Indicador cuando se realice la carga del banco de baterías.
- Indicador cuando se complete un ciclo de carga del banco de baterías.

Además, se incorpora un indicador sonoro (buzzer) el cual se activa cuando el estado de carga es bajo y cuando se ha completado un ciclo de carga. La detección de carga se lo realiza mediante el pin auxiliar que contiene el cargador, el cual se conecta a una entrada analógica del microcontrolador. El PCB fabricado para este circuito se presenta en la Figura D.15

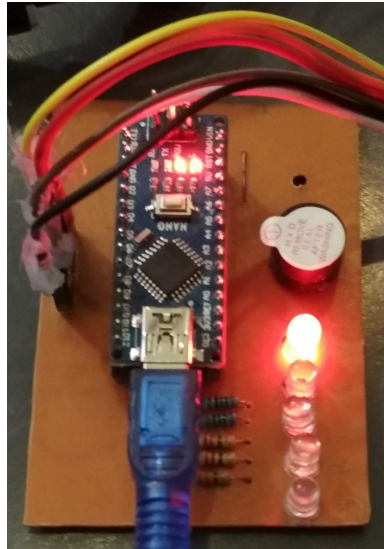


Figura D.15: PCB de los indicadores y el microcontrolador Arduino NANO  
Fuente: Autores

#### D.4.2. Segunda versión del Algoritmo

Para este prototipo se tomó en algoritmo diseñado en el punto D.2 y se agregaron dos funciones extras: una función que en base a el voltaje del banco de baterías indique si este se encuentre en un nivel bajo, medio o alto a través de 3 leds y un buzzer que se encenderá si el voltaje entra en la zona de baja carga, y una función que determine si las baterías se encuentran cargando, cargadas o si estas no están conectadas al cargador.

##### A. Función de Estado de Carga

Esta función permite encender y apagar 3 leds que indican el estado de carga del banco de baterías. El objetivo de esto es tener una alarma visual en el PCB del Sistema de Gestión.

Según el voltaje esté alto (mayor e igual a 27 V), medio (voltaje entre 27 y 25 V) o bajo (menor a 25), uno de estos tres leds se encenderá. Además, se incluye un buzzer el cual se activará en periodos de aproximadamente 200 ms siempre que el estado de carga se encuentre en bajo, con lo que se obtiene una alarma auditiva indicando que las baterías



están próximas a agotarse.

En el Algoritmo D.8 se observa el código de esta función. Aquí se ven los 3 leds denominados: `led_alto`, `led_medio` y `led_bajo`, así como una función extra que permite activar el buzzer cuando se detecte un nivel bajo de carga.

```
2 void estado(float cargaT) {  
    if (cargaT >= 27) {  
4         digitalWrite(led_alto, HIGH);  
         digitalWrite(led_medio, LOW);  
6         digitalWrite(led_bajo, LOW);  
    }  
8     else if ( cargaT < 27 && cargaT > 25) {  
         digitalWrite(led_alto, LOW);  
10        digitalWrite(led_medio, HIGH);  
         digitalWrite(led_bajo, LOW);  
12        Serial.println("Led_medio");  
    }  
14    }  
    else {  
16        on_buzzer();  
         digitalWrite(led_alto, LOW);  
18        digitalWrite(led_medio, LOW);  
         digitalWrite(led_bajo, HIGH);  
20        Serial.println("Led_bajo");  
         on_buzzer();  
22    }  
24 }  
  
26 void on_buzzer() {  
28     if (carga == 0) {  
         digitalWrite(buzzer, HIGH);  
30         delay(200);  
         digitalWrite(buzzer, LOW);  
32         delay(200);  
    }  
34 }
```

Algoritmo D.8: Función Prototipo de Estado de Carga

## B. Función de Carga de Celdas

Para la función de carga de baterías, en primer lugar, se toma una medición del pin analógico 0 del microcontrolador el cual está conectado al pin de control del cargador. En base al voltaje medido en este pin se puede determinar si se encuentran cargando las celdas

(voltaje mayor a 15 V), si se encuentran cargando las celdas (voltaje entre 1 y 6 V) o si se ha conectado el cargador, pero no se han conectado las baterías a este.

En base al valor medido se determina el estado de la carga y se enciende uno de los respectivos leds (led cargando o led de carga finalizada), además en cuanto haya finalizado la carga se encenderá el buzzer de forma continua hasta que el cargador sea retirado, esto con la finalidad de dar a conocer mediante una alarma auditiva que la carga ha terminado.

Cabe indicar que como el voltaje que entrega el cargador es más de 15 V en su pin de control, es necesario implementar un divisor de tensión, para así no quemar el puerto analógico del microcontrolador cuyo valor máximo de entrada es 5 V. El Algoritmo D.9 presenta el código de esta función.

```
1
3 void carga_celdas() {
4     valor = (analogRead(0)) / 1024.0; // Lee el voltaje del pin
5     valor = valor * 5.0;               // del cargador y lo ajusta
6     medida = valor * 3.8;              // a un valor real
7
8     // Se muestra el valor medido
9     Serial.println("El valor del pin es:" + String(medida));
10
11     if (medida > 1.0 && medida <= 6.0) { // Se cargo el banco
12         Serial.println("Carga: Cargado");
13         digitalWrite(led_cargando, LOW);
14         digitalWrite(led_cargado, HIGH);
15         digitalWrite(buzzer, HIGH);
16         carga = 1;
17     }
18
19     else if (medida >= 15.0) { // Se encuentra cargando
20         Serial.println("Carga: Cargando");
21         digitalWrite(led_cargando, HIGH);
22         digitalWrite(led_cargado, LOW);
23         digitalWrite(buzzer, LOW);
24         carga = 1;
25     }
26
27     else { // No se han conectado las celdas
28         Serial.println("Carga: No hay celdas");
29         digitalWrite(led_cargando, LOW);
30         digitalWrite(led_cargado, LOW);
31         digitalWrite(buzzer, LOW);
32         carga = 0;
33     }
34 }
```

---

#### Algoritmo D.9: Función Prototipo de Carga de Celdas

Por último, se modificó la función de balanceo de celdas para que esta se realice de forma automática si se detecta una diferencia mayor o igual a 0.1 V entre la celda de menor potencial y la de mayor potencial, evitando así un desbalance considerable entre celdas.

## D.5. Pruebas y Resultados de Segundo Prototipo

Para comprobar las modificaciones hechas tanto al algoritmo como al circuito del prototipo 1 se realizó la descarga de las celdas partiendo en primer lugar de los valores mostrados en la Tabla D.4, con un voltaje de 26.662 V.

Tabla D.4: Voltaje de las Celdas antes de ser descargadas

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.332	3.333	3.334	3.332	3.332	3.332	3.334	3.333

Fuente: Autores

En la Figura D.16 se muestra el led amarillo que indica un porcentaje medio de batería (voltaje entre 27 y 25 V) ya que el voltaje total del banco es de 26.662 V.

Luego de la correspondiente descarga se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla D.5, dando un total de 24.99 V, con lo que el led rojo de baja carga se encendió, Figura D.17. A la vez el buzzer comenzó a emitir sonido. Con esto se concluye que estas modificaciones al prototipo funcionan.

Tabla D.5: Voltaje de las Celdas luego de la descarga

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.123	3.124	3.125	3.123	3.123	3.123	3.125	3.124

Fuente: Autores

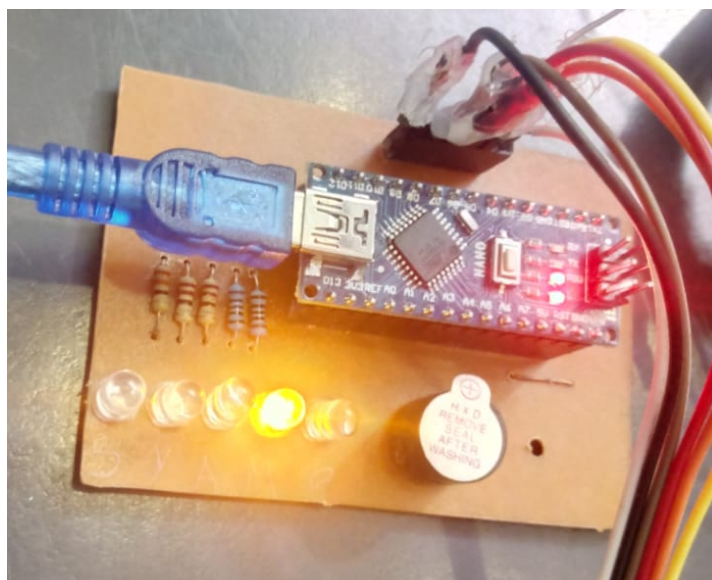


Figura D.16: Indicador led de carga media  
Fuente: Autores

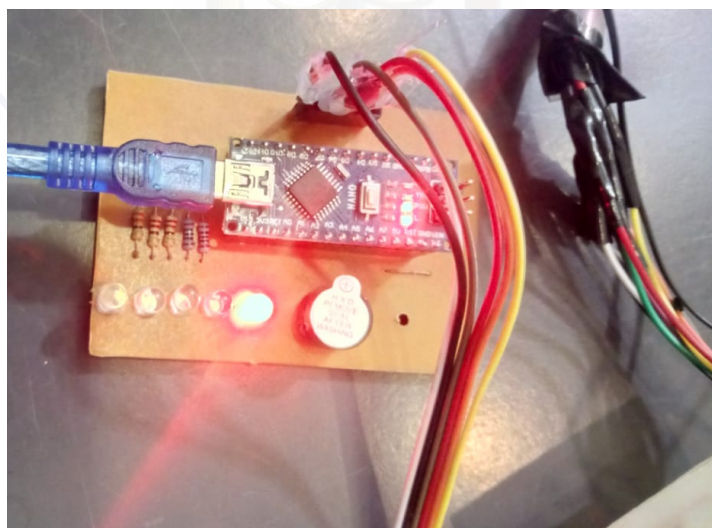


Figura D.17: Indicador led de carga baja  
Fuente: Autores

## D.6. Aplicación del Cargador

### D.6.1. Carga de Celdas

Para poner a prueba el cargador PB-360P-24 se procedió a descargar las baterías hasta alcanzar los voltajes presentes en la Tabla D.6.

Tabla D.6: Voltaje de las Celdas previo a la carga

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.035	3.041	3.054	3.042	3.058	3.011	2.81	2.83

Fuente: Autores

Para iniciar con la carga se conectó el banco de baterías al cargador y este automáticamente empezó a cargar las baterías. El resultado de la carga se observa en la Figura D.18. Esta imagen presenta 5 escenarios que son:

- El voltaje de las baterías antes de iniciar la carga, estos valores son los de la Tabla D.6.
- Se conecta el cargador, el voltaje comienza a incrementar y seguirá incrementando hasta alcanzar la carga máxima, tal como lo indica la Figura 4.9.
- Se alcanza la carga máxima, un valor de 28.782 V en un tiempo de 70 minutos.
- Se desconecta el cargador del banco de baterías y el voltaje comienza a disminuir.
- Luego de un tiempo el voltaje del banco de baterías se estabiliza en 28.645 V, siendo este el valor final de la carga alcanzada.

Los voltajes de cada celda se presentan en la Tabla D.7. Con estos datos se puede notar que la diferencia entre el valor de la celda más alta (Celda 5) con respecto a la más baja (celda 8) es de 0.01 V a diferencia de los 0.248 V que se obtiene antes de realizar la carga.

Tabla D.7: Voltaje de las Celdas luego de la carga

Celda	1	2	3	4	5	6	7	8
Voltaje (V)	3.581	3.582	3.582	3.582	3.584	3.581	3.579	3.579

Fuente: Autores

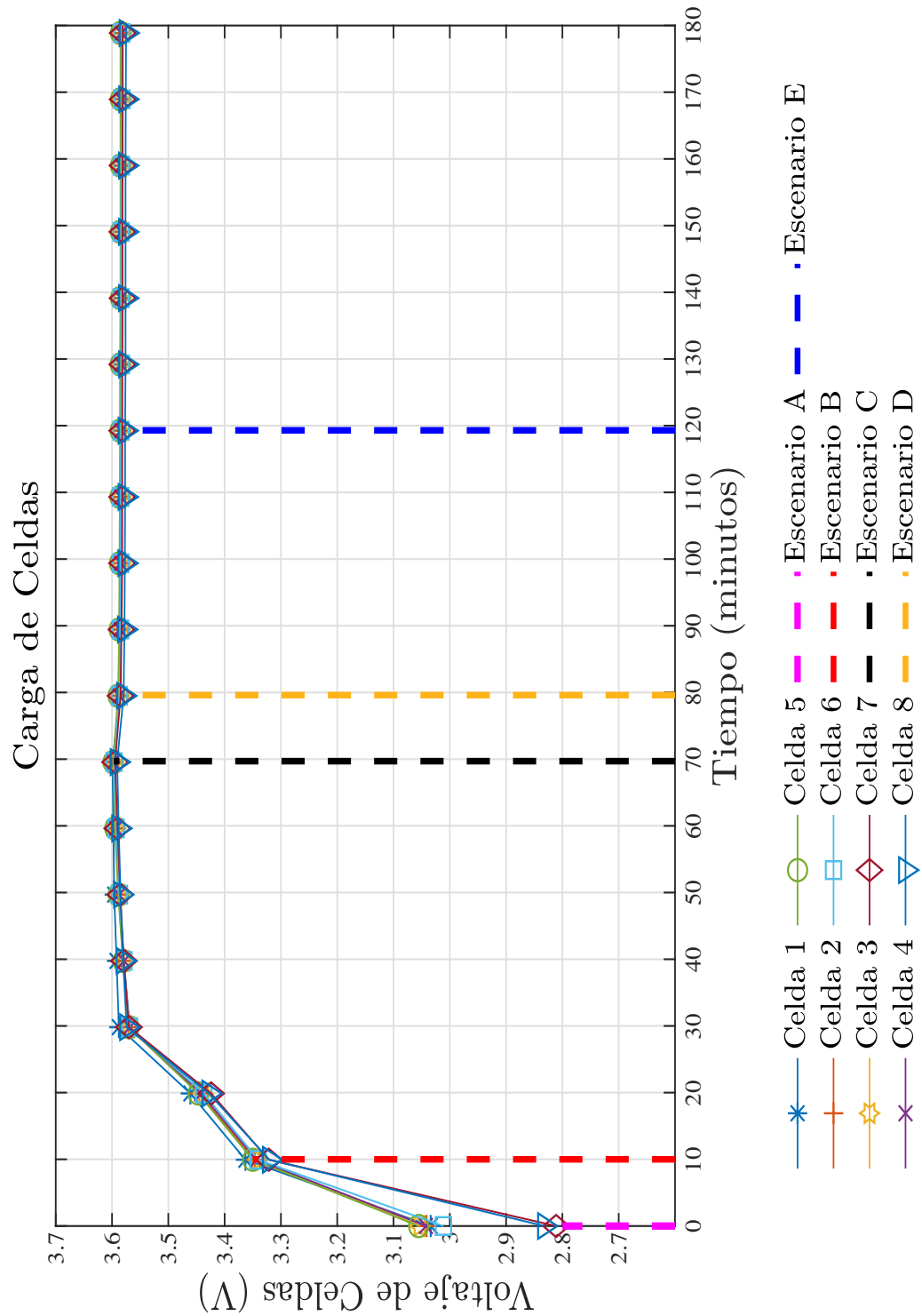


Figura D.18: Curva de Voltaje de las Celdas usando el cargador PB-360P-24  
Fuente: Autores

### D.6.2. Aplicación del Sensor de Corriente



En esta parte se implementó el sensor de corriente, para así verificar su correcto funcionamiento al medir la corriente entregada por el cargador.

En [29] se indica que, para obtener una medición correcta de corriente, es necesario construir una ecuación mediante la cual según el valor de voltaje que entregue el sensor, se determine el valor de corriente que circula por este. Este proceso de calibración se encuentra en el Anexo [B.2](#).

Según [26] el cargado comienza entregando aproximadamente 12.5 A de corriente, para luego comenzar a disminuir este valor de forma constante hasta alcanzar un 10 % de este valor máximo (unos 1.25 A).

El sensor se conectó en serie al cable que conecta el banco de baterías con el cargador y se comenzó a recopilar datos. El resultado final se observa en la Figura [D.19](#), en donde se obtuvo un máximo de 12.8 A en los primeros 8 minutos, para luego comenzar a disminuir de forma casi lineal hasta los 1.45 A a los 69 minutos, a partir de este instante la carga se da por finalizada y la corriente disminuye a los 0 A.

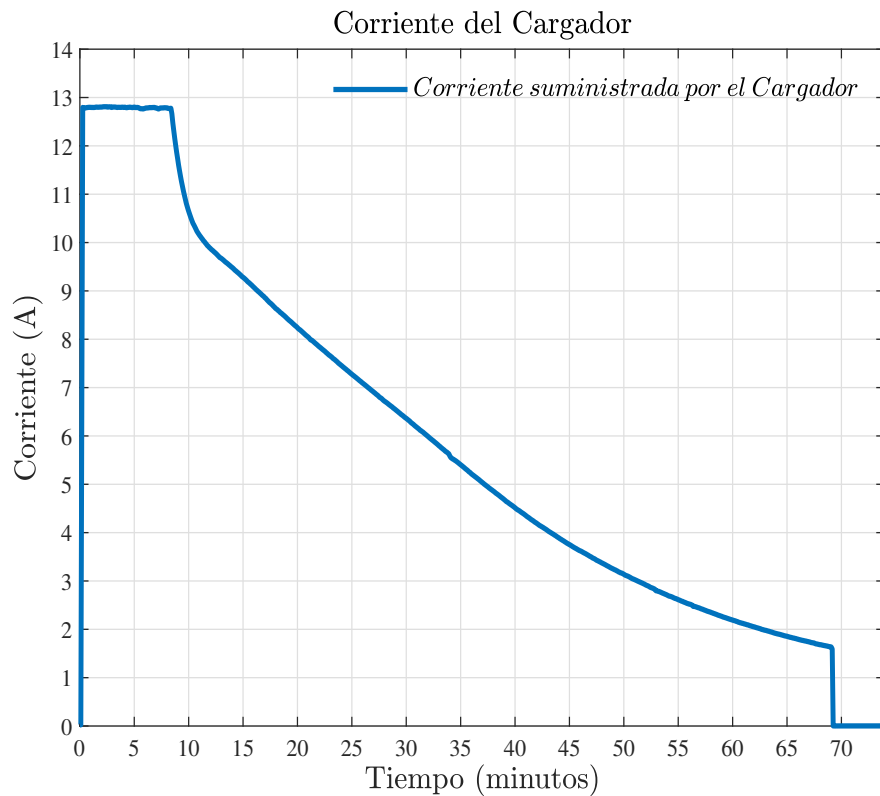


Figura D.19: Celdas

Fuente: Autores

### D.6.3. Medición de Temperatura durante la Carga

Como última prueba con respecto a la carga de celdas, se tiene la implementación de los termistores, de los cuales el primero se colocó entre la Celda 1 y 2 y el segundo termistor entre la Celda 5 y 6.

La Figura D.20 muestra las mediciones tomadas durante los 180 minutos que se dejó actuar el sistema. En esta gráfica se observa que la temperatura no varía de 23 °C, valor que se encuentra dentro del rango de operación de las celdas indicados en la Tabla 3.5, por lo tanto, no existe riesgo alguno de sobre calentamiento.

De esta manera se comprobó que tanto el sensor como el cargador funcionan correctamente, y que las celdas no sufrirán fallos por temperatura, por lo que se están listo para ser agregados en el diseño final del sistema.



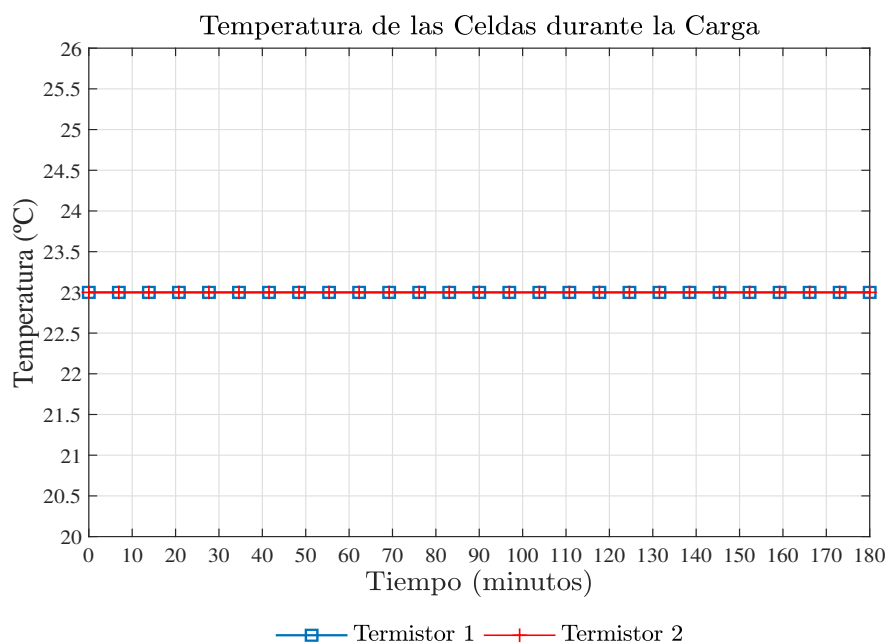


Figura D.20: Celdas  
Fuente: Autores

## D.7. Pruebas de los Conversores DC-DC

Como última prueba, se debe constatar que las fuentes DC-DC mencionadas con anterioridad cumplan su propósito, el cual es alimentar a la electrónica asociada al banco de baterías. Para esto se fabricó un PCB, indicado en C.4, el cual alberga dichas fuentes con sus respectivas salidas, estos se conectan directamente al banco de baterías a través de dos cables AWG 8, suministrando así las salidas de: 5 V y 3.3 V.

En la Figura D.21 se muestra la raspberry alimentada por el conversor DC-DC de 5 V a 3 A, el cual tiene como salida un conector USB, este puerto es exclusivamente para uso de la Raspberry.

Para verificar la correcta operación de los conversores VX780X-1000, es decir los conversores de 5 y 3.3 V, se procede a medir los voltajes en los pines de salida, estos están ubicados en el conector 4x2, en las Figuras D.22 y D.23 se observa la medición tanto para la fuente de 5 V como para la fuente de 3.3 V.

De esta forma se concluye que los circuitos propuestos para el balanceo, conversores, así como el cargador y la comunicación entre el microcontrolador y el integrado LTC funcionan de forma correcta y se está listo para realizar el diseño final del sistema de gestión de energía.

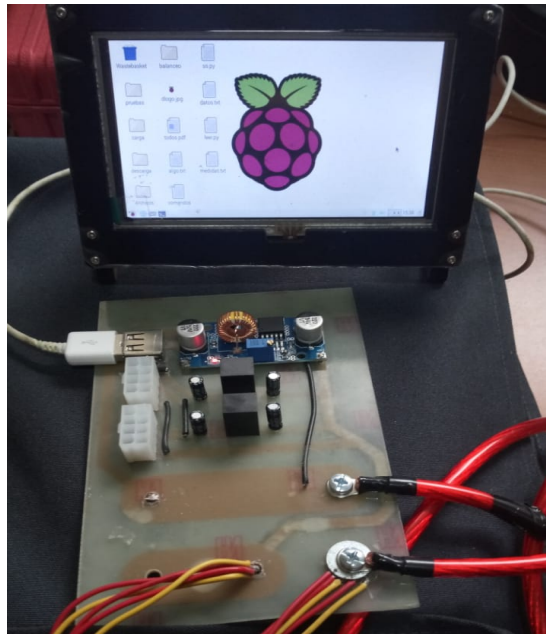


Figura D.21: Sistema alimentando al raspberry  
Fuente: Autores



Figura D.22: Salida de 5 V  
Fuente: Autores



Figura D.23: Salida de 3.3 V  
Fuente: Autores

## Anexo E

# Funciones del Microcontrolador

### E.1. Función de Escritura de Registros

```
2 //#####
3 //      FUNCION DE ESCRITURA DE REGISTROS DE CONFIGURACION
4 //#####
5
6 void ConfReg()
7 {
8     Serial.println("Escribiendo registros.....");
9     digitalWrite(10, LOW); // Coloca en low el pin CSBI
10    SPI.transfer(ID_CHIP); // Indica el chip a escribir, en este caso el 0000
11    SPI.transfer(WRCFG);    // Comando para escribir configuracion
12
13    // Desde aqui se escriben los respectivos registros
14
15    SPI.transfer(0x81); // Manda 0000 0000 al registro CFGR0
16    SPI.transfer(CFGR1); // Manda 0000 1000 al registro CFGR1
17    SPI.transfer(0x00); // Manda 0000 0000 al registro CFGR2
18    SPI.transfer(0x00); // Manda 0000 0000 al registro CFGR3
19    SPI.transfer(0x75); // Manda 0111 0001 al registro CFGR4
20    SPI.transfer(0xAB); // Manda 1010 1011 al registro CFGR5
21
22    digitalWrite(10, HIGH); // Termino de enviar, coloca en high el pin CSBI
23 }
```

Algoritmo E.1: Función de Escritura de Registros

## E.2. Función de Lectura de Voltajes

```
// #####  
2 //      FUNCION DE LECTURA DE VOLTAJES  
// #####  
4  
void Voltaje_Celdas() {  
6     digitalWrite(10, LOW); // Coloca en bajo el pin CSBI  
    SPI.transfer(STCVAD); // Activa el ADC  
8     delay(20); //      // Espera 20 ms  
    digitalWrite(10, HIGH);  
10    byte volt[18];  
    digitalWrite(10, LOW);  
12    SPI.transfer(ID_CHIP);  
    SPI.transfer(RDCV);  
14    for (int j = 0; j < 18; j++)  
    {  
16        volt[j] = SPI.transfer(RDCV);  
    }  
18    digitalWrite(10, HIGH);  
    // Conversion de valores de los registros a valores de voltaje real  
20    float voltajes[8];  
    voltajes[0] = (((volt[0] & 0xFF) | (volt[1] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);  
22    voltajes[1] = (((volt[1] & 0xF0) >> 4 | (volt[2] & 0xFF) << 4) * 1.5 * 0.001);  
    voltajes[2] = (((volt[3] & 0xFF) | (volt[4] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);  
24    voltajes[3] = (((volt[4] & 0xF0) >> 4 | (volt[5] & 0xFF) << 4) * 1.5 * 0.001);  
    voltajes[4] = (((volt[6] & 0xFF) | (volt[7] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);  
26    voltajes[5] = (((volt[7] & 0xF0) >> 4 | (volt[8] & 0xFF) << 4) * 1.5 * 0.001);  
    voltajes[6] = (((volt[9] & 0xFF) | (volt[10] & 0x0F) << 8) * 1.5 * 0.001);  
28    voltajes[7] = (((volt[10] & 0xF0) >> 4 | (volt[11] & 0xFF) << 4) * 1.5 *  
        0.001);  
    banco = 0.0;  
30  
    for (int j = 0; j < 8; j++) {  
32        Serial.print("Celda " + String(j + 1) + ": ");  
        Serial.print(voltajes[j], 3);  
34        Serial.println(" V");  
        delay(100);  
36        banco = banco + voltajes[j];  
    }  
38    Serial.println("Banco: " + String(banco) + " V");  
    estado(banco); // Funcion de estado de Carga  
40    balanceo(voltajes); // Funcion de balanceo de Celdas  
    delay(100);  
42  
}
```

Algoritmo E.2: Función de lectura de voltajes

### E.3. Función de Lectura de Temperatura

```
// #####  
2 //      FUNCION DE LECTURA DE TEMPERATURA  
// #####  
4  
void Lectura_Temperatura() {  
6     ConfReg();  
    float voltaje1; // Variables de lectura de voltaje  
8     float voltaje2; // de los pines Vtemp1 y Vtemp2  
    delay(100);  
10    digitalWrite(10, LOW);  
    SPI.transfer(STMPAD); // Activa la conversion ADC  
12    delay(20);           // Se espera 20 ms  
    digitalWrite(10, HIGH);  
14    byte temperaturas[5]; // Variable que almacena los datos  
    digitalWrite(10, LOW); // se pone en 0 para enviar  
16    SPI.transfer(ID_CHIP);  
    SPI.transfer(RDTMP); // Comando para indicar lectura  
18    for (int i = 0; i < 5; i++) { // Se lee los registros  
        temperaturas[i] = SPI.transfer(RDTMP);  
20    }  
    digitalWrite(10, HIGH);  
22    // Transforma los valores leidos en valores reales  
    voltaje1 = ((temperaturas[0] & 0xFF) | (temperaturas[1] & 0x0F) << 8) * 1.5 *  
        0.001;  
24    voltaje2 = ((temperaturas[1] & 0xF0) >> 4 | (temperaturas[2] & 0xFF) << 4) *  
        1.5 * 0.001;  
    // se transforman los valores de voltaje en su correspondiente valor de  
        temperatura  
26    Serial.print("Temperatura 1: ");  
    Serial.print(Temperatura(voltaje1));  
28    Serial.println(" C ");  
    Serial.print("Temperatura 2: ");  
30    Serial.print(Temperatura(voltaje2));  
    Serial.println(" C ");  
32 }  
  
34 int Temperatura(float voltaje) {  
    int valor_temp;  
36    tmin = yi + mmin * (voltaje - xmin);  
    tmax = yi + mmax * (voltaje - xmax);  
38    valor_temp = round((tmin + tmax) / 2);  
    return valor_temp;  
40 }  
}
```

Algoritmo E.3: Función de lectura de temperatura

## E.4. Función de Balanceo de Celdas

```
//#####  
2 //      FUNCION DE BALANCEO DE CELDAS  
//#####  
4  
6 void balanceo(float vector[8]) {  
8     CFGR1 = 0x00;  
    // Se busca la celda con el voltaje minimo  
10    float mini = 10.2;  
    int indice = 0;  
12    float diferencia = 0;  
    // Se obtiene el voltaje minimo  
14    for (int i = 0; i < 8; i++) {  
        if (vector[i] < mini) {  
16            mini = vector[i];  
            indice = i;  
18        }  
    }  
    // Se comprueba si es necesario el balanceo  
20    for (int i = 0; i < 8; i++) {  
        if ((vector[i] - mini) > 0.1) {  
22            balancear = 1;  
            break;  
24        }  
    }  
  
26    if (balancear == 1) { // Si es necesario el balanceo, este se activa  
        Serial.println("La celda minima es: Celda" + String(indice + 1) + " con " +  
            String(mini) + " V");  
28        for (int i = 0; i < 8; i++) {  
            diferencia = vector[i] - mini;  
30            if (diferencia > 0.01) {  
                CFGR1 += 0x01 << (i);  
32                Serial.print("La celda a balancear es:" + String(i + 1) + ", con :");  
                Serial.println(vector[i], 3);  
34            }  
            else {  
36                CFGR1 += 0x00 << (i);  
            }  
38            if (CFGR1 == 0x00) {  
                balancear = 0;  
40            }  
        }  
42    }  
44 }
```

Algoritmo E.4: Función de Balanceo de Celdas

## E.5. Función de Estado de Carga

```
1 //#####
2 //      FUNCION DE ESTADO DE CARGA
3 //#####
4
5 void estado(float cargaT) {
6     if (cargaT >= 27) {
7         digitalWrite(led_alto, HIGH);
8         digitalWrite(led_medio, LOW);
9         digitalWrite(led_bajo, LOW);
10        Serial.println("Carga: Alta");
11    }
12
13    else if ( cargaT < 27 && cargaT > 25) {
14        digitalWrite(led_alto, LOW);
15        digitalWrite(led_medio, HIGH);
16        digitalWrite(led_bajo, LOW);
17        Serial.println("Carga: Media");
18    }
19
20    else {
21        on_buzzer();
22        digitalWrite(led_alto, LOW);
23        digitalWrite(led_medio, LOW);
24        digitalWrite(led_bajo, HIGH);
25        Serial.println("Carga: Baja");
26        on_buzzer();
27        // Si detecta una carga baja, se activa el buzzer
28    }
29 }
30
31
32 //#####
33 //      ALARMA DE BAJA CARGA
34 //#####
35 void on_buzzer() {
36     if (carga == 0) {
37         digitalWrite(buzzer, HIGH);
38         delay(200);
39         digitalWrite(buzzer, LOW);
40         delay(200);
41     }
42 }
43 }
```

Algoritmo E.5: Función de estado de Carga





## E.6. Función de Carga de Celdas

```
2 //#####
3 //          FUNCION DE CARGA DE CELDAS
4 //#####
5
6 void carga_celdas() {
7
8     // Lectura del pin del cargador
9     valor = (analogRead(0)) / 1024.0; // Lee el voltaje del pin
10    valor = valor * 5.0;                // del cargador y lo ajusta
11    medida = valor * 3.8;                // a un valor real
12    Serial.println("Pin del cargador : " + String(medida));
13
14    if (medida < 1) {
15        Serial.println("Carga: No se ha conectado el cargador");
16        digitalWrite(led_cargando, LOW);
17        digitalWrite(led_cargado, LOW);
18        digitalWrite(buzzer, LOW);
19        carga = 0;    // Indica que no esta conectado el cargador
20    }
21    else {
22        if (medida > 1.0 && medida <= 6.0) { // Se cargo el banco
23            Serial.println("Carga: Cargado");
24            digitalWrite(led_cargando, LOW);
25            digitalWrite(led_cargado, HIGH);
26            digitalWrite(buzzer, HIGH);
27            carga = 1;
28        }
29        else if (medida >= 15.0) { // Se encuentra cargando
30            Serial.println("Carga: Cargando");
31            digitalWrite(led_cargando, HIGH);
32            digitalWrite(led_cargado, LOW);
33            digitalWrite(buzzer, LOW);
34            carga = 1;
35        }
36        else { // No se han conectado las celdas
37            Serial.println("Carga: No hay celdas");
38            digitalWrite(led_cargando, LOW);
39            digitalWrite(led_cargado, LOW);
40            digitalWrite(buzzer, LOW);
41            carga = 0;
42        }
43    }
44 }
45 }
```

Algoritmo E.6: Función de estado de Carga

## E.7. Función de Medición de Corriente

```
2  //          FUNCION DE SENSOR DE CORRIENTE
4  //          #####
6  void Corriente(float Sensibilidad, float offset, String tipoSensor, int
    puertoSensor) {
8      float voltajeSensor;
9      float corrienteSum = 0;
10     for (int i = 0; i < samplesNumber; i++) {
11         voltajeSensor = analogRead(puertoSensor) * 5.0 / 1023.0;
12         realCorriente = voltajeSensor - offset;
13
14         corrienteSum += (realCorriente) / Sensibilidad;
15     }
16
17     corrienteSum = corrienteSum / samplesNumber;
18     Serial.print("Corriente de " + tipoSensor + ": ");
19     Serial.print(corrienteSum);
20     Serial.println(" A");
22 }
```

Algoritmo E.7: Función de Medición de Corriente



## Anexo F

# Pruebas del Sistema de Gestión de Energía

Este Anexo presenta las gráficas de los resultados obtenidos durante las pruebas del Sistema de Gestión de Energía.

Las gráficas de Corriente, Voltaje de Banco y Energía se obtuvieron usando el medidor HIOKI PW 3337 proporcionado por el Laboratorio de Energía de la Universidad de Cuenca. Con el Sistema de Gestión de Energía se obtuvieron gráficas de Voltaje de Celdas, Voltaje del Banco y Corriente.

Los datos de ambos equipos de medición (HIOKI y Sistema de Gestión de Energía) se presentan en una misma gráfica, con el objetivo de comparar las muestras obtenidas.

## F.1. Balanceo de Celdas

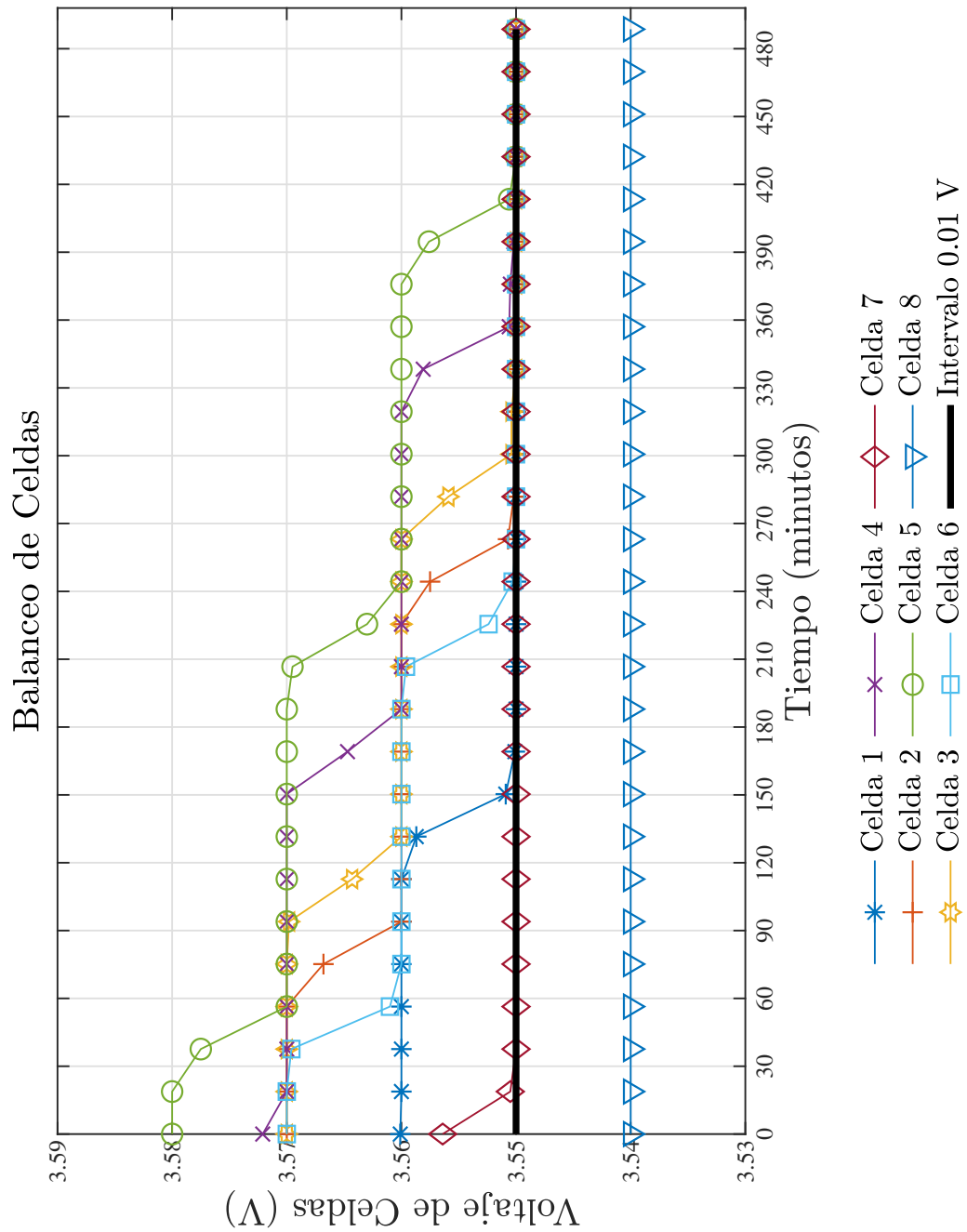


Figura F.1: Resultado del Balanceo de Celdas

Fuente: Autores

## F.2. Resultados de la Primera Prueba

### F.2.1. Voltaje del Banco Durante la Descarga

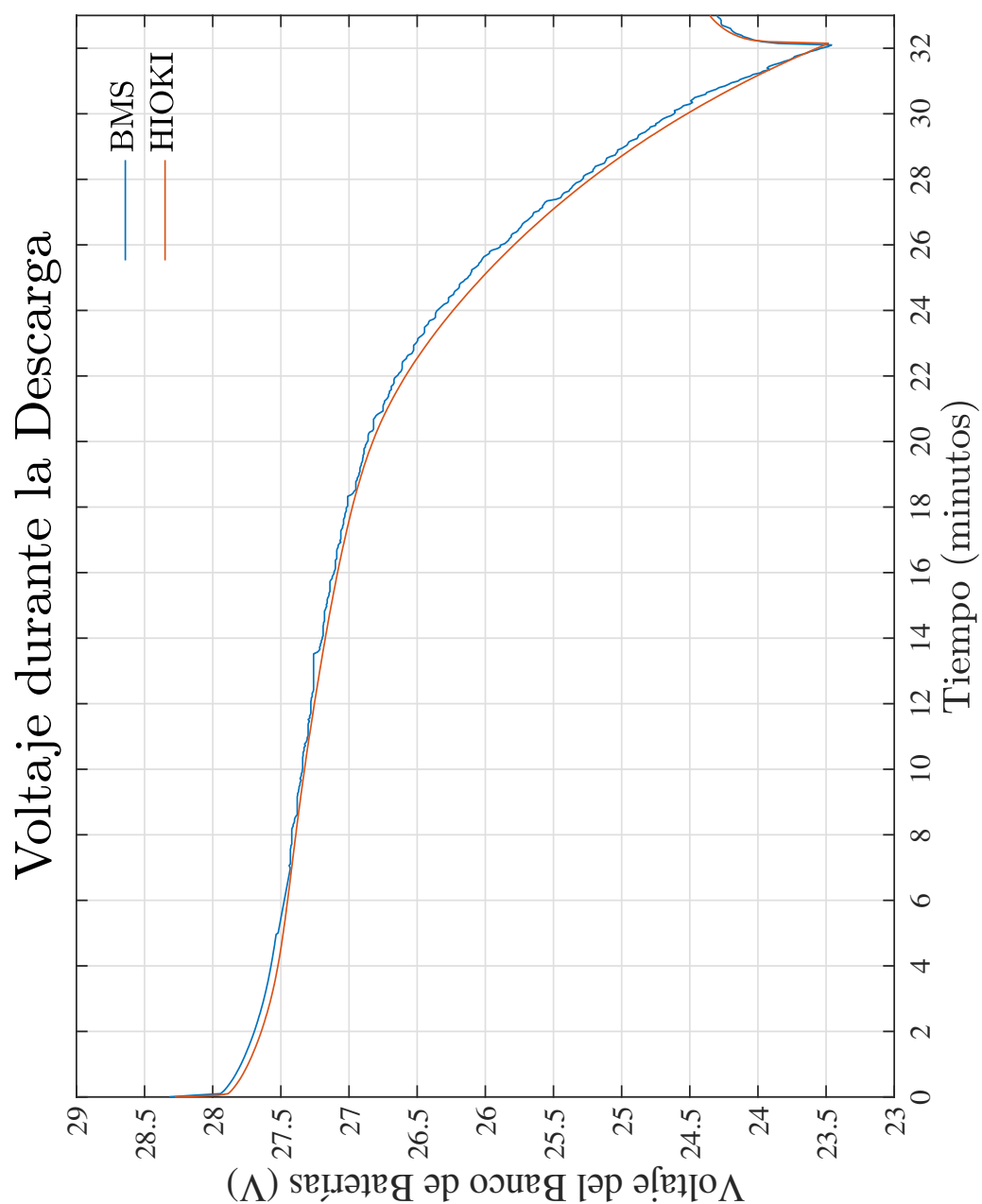


Figura F.2: Voltaje durante la Descarga

Fuente: Autores

### F.2.2. Voltaje de las Celdas durante la Descarga

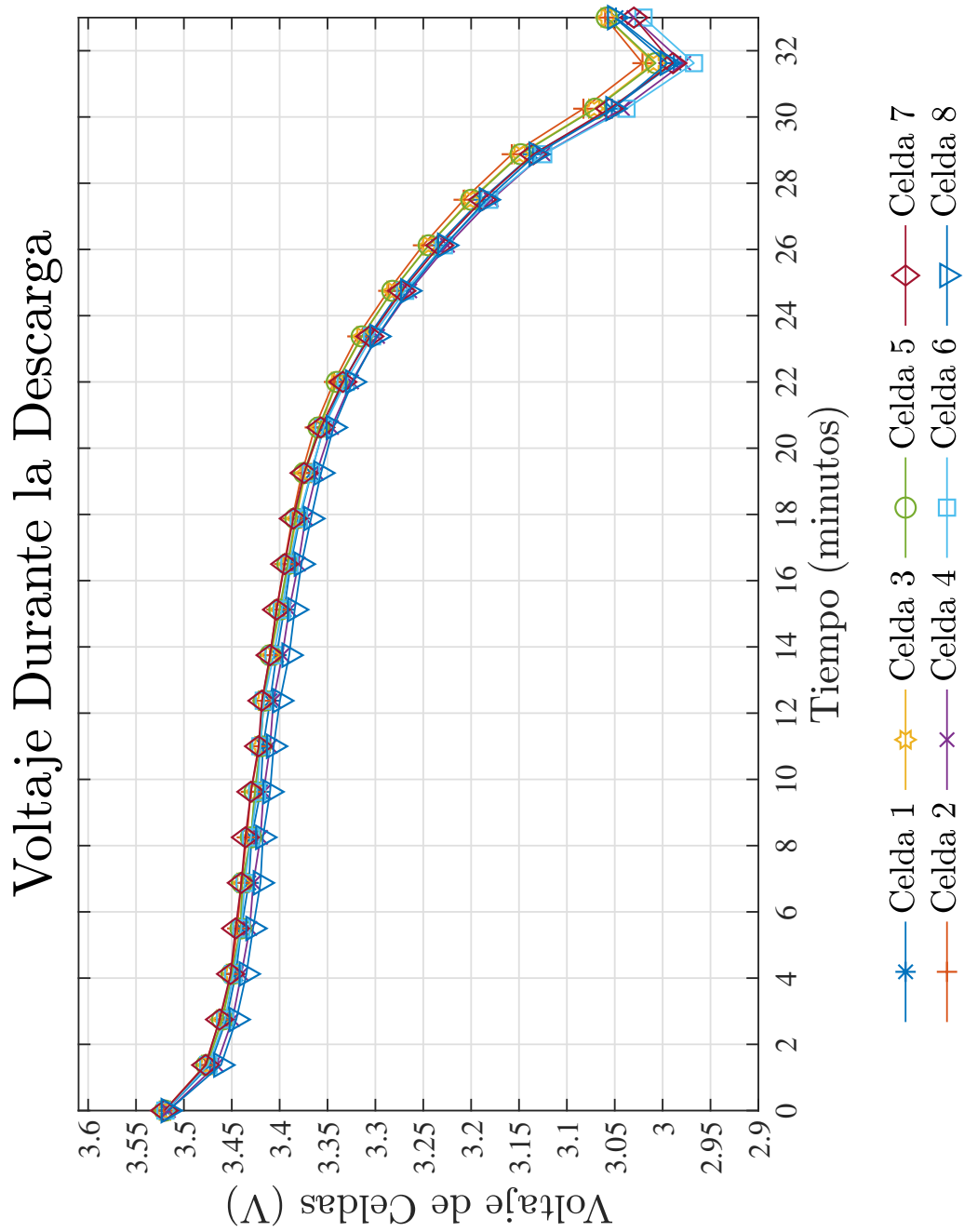


Figura F.3: Voltaje de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

### F.2.3. Corriente durante la Descarga

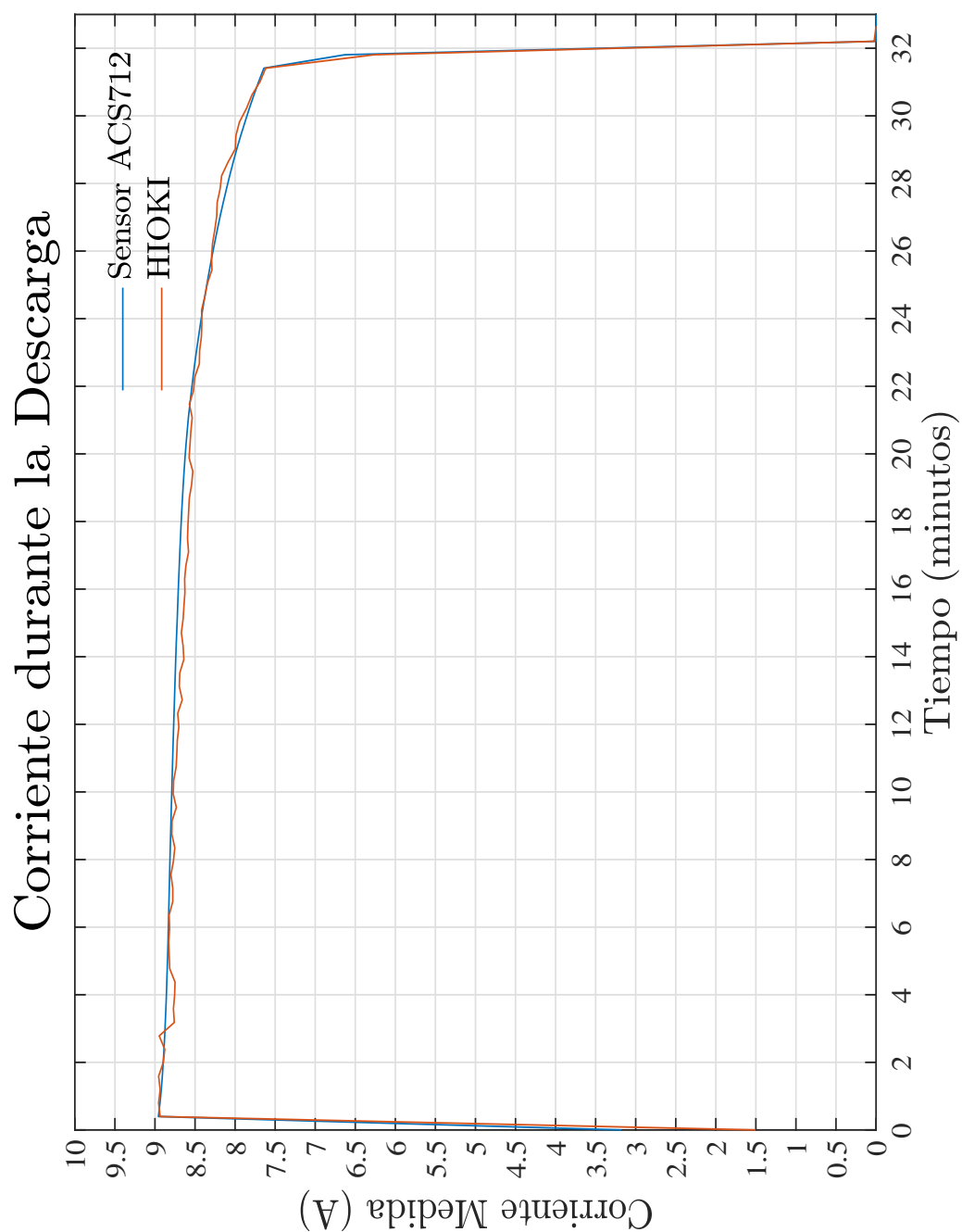


Figura F.4: Corriente de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

## F.2.4. Energía entregada por el Banco de Baterías

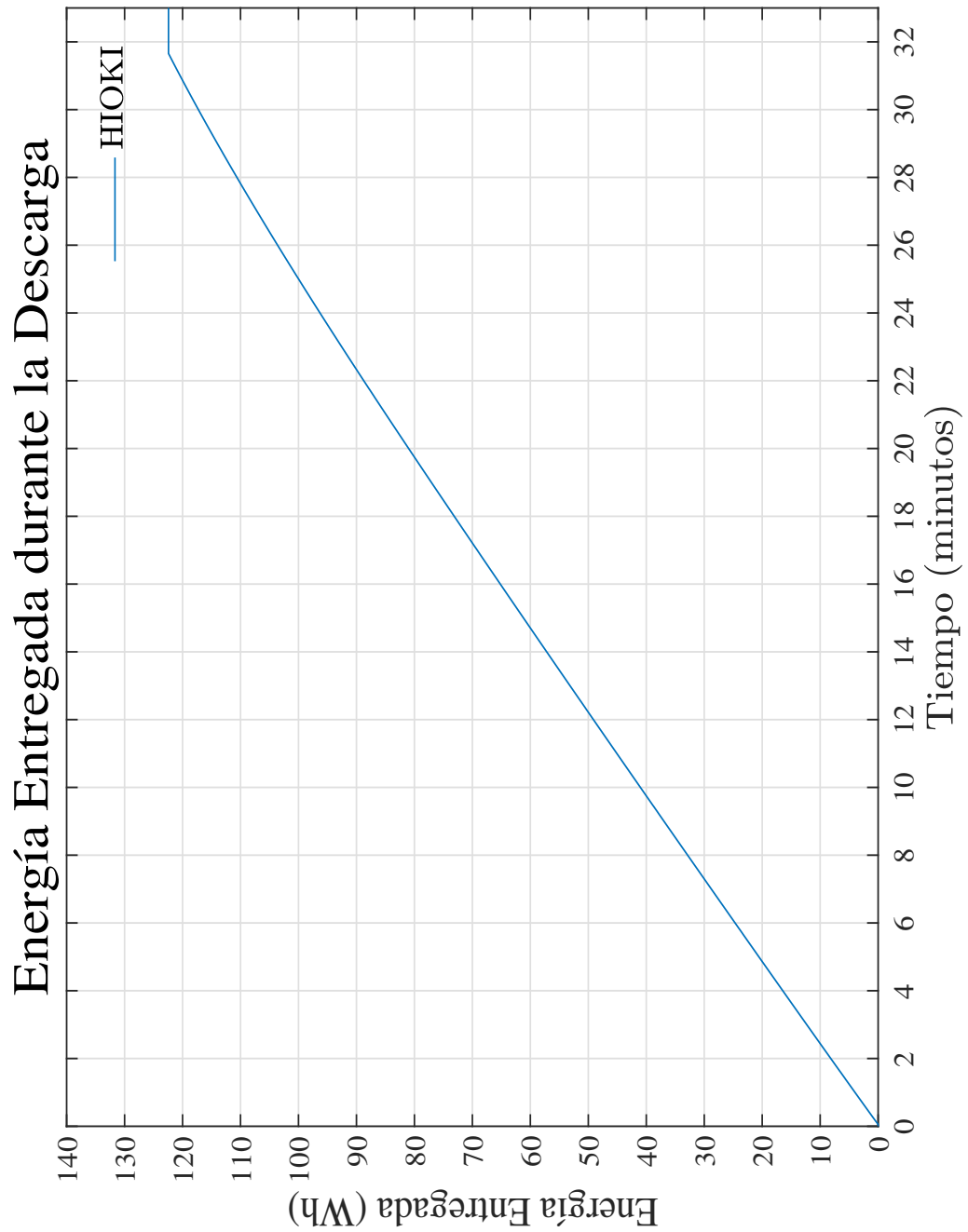


Figura F.5: Energía Entregada por el Banco de Baterías

Fuente: Autores



## F.2.5. Voltaje del Banco Durante la Carga

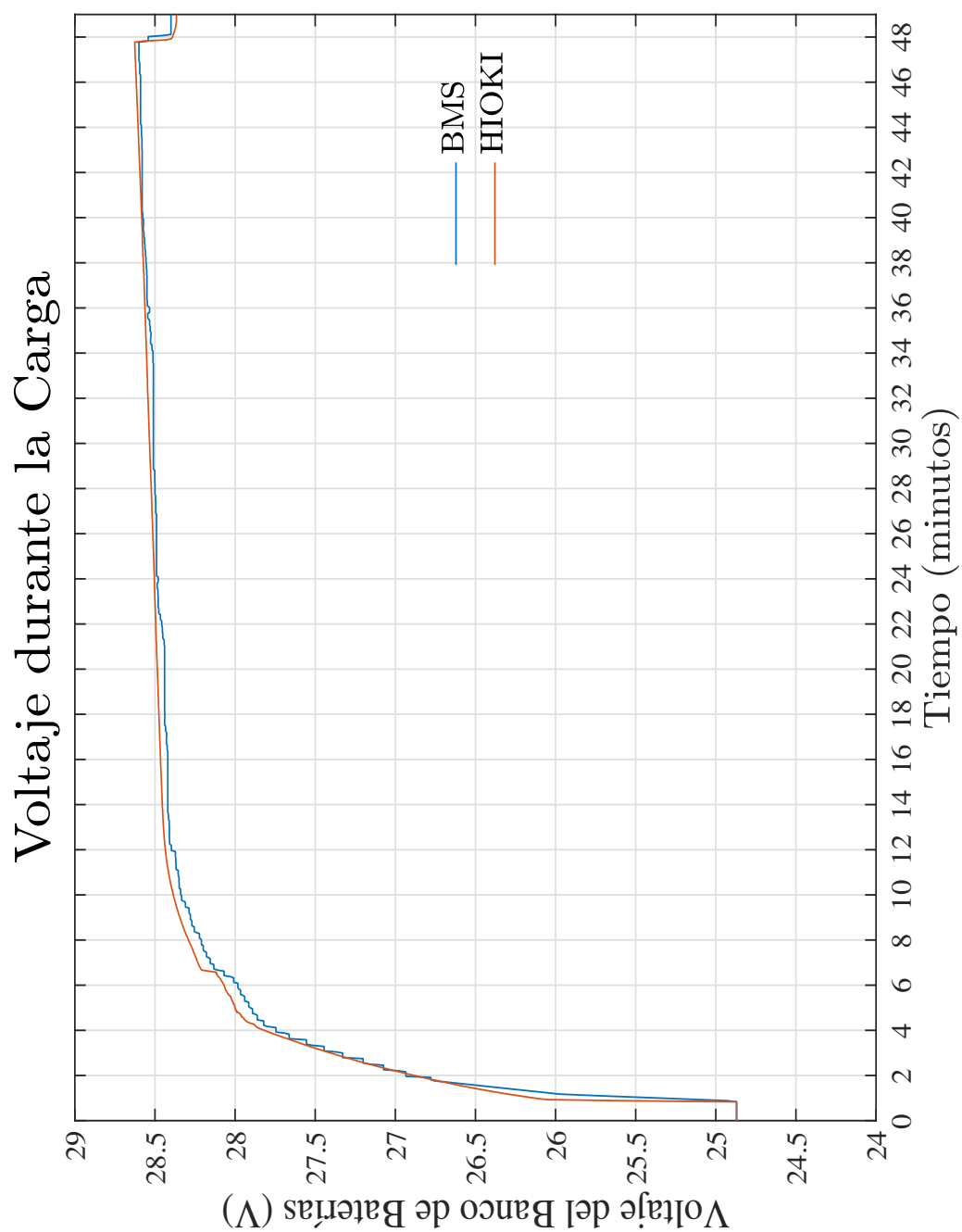


Figura F.6: Voltaje Durante la Carga

Fuente: Autores

### F.2.6. Voltaje de las Celdas durante la Carga

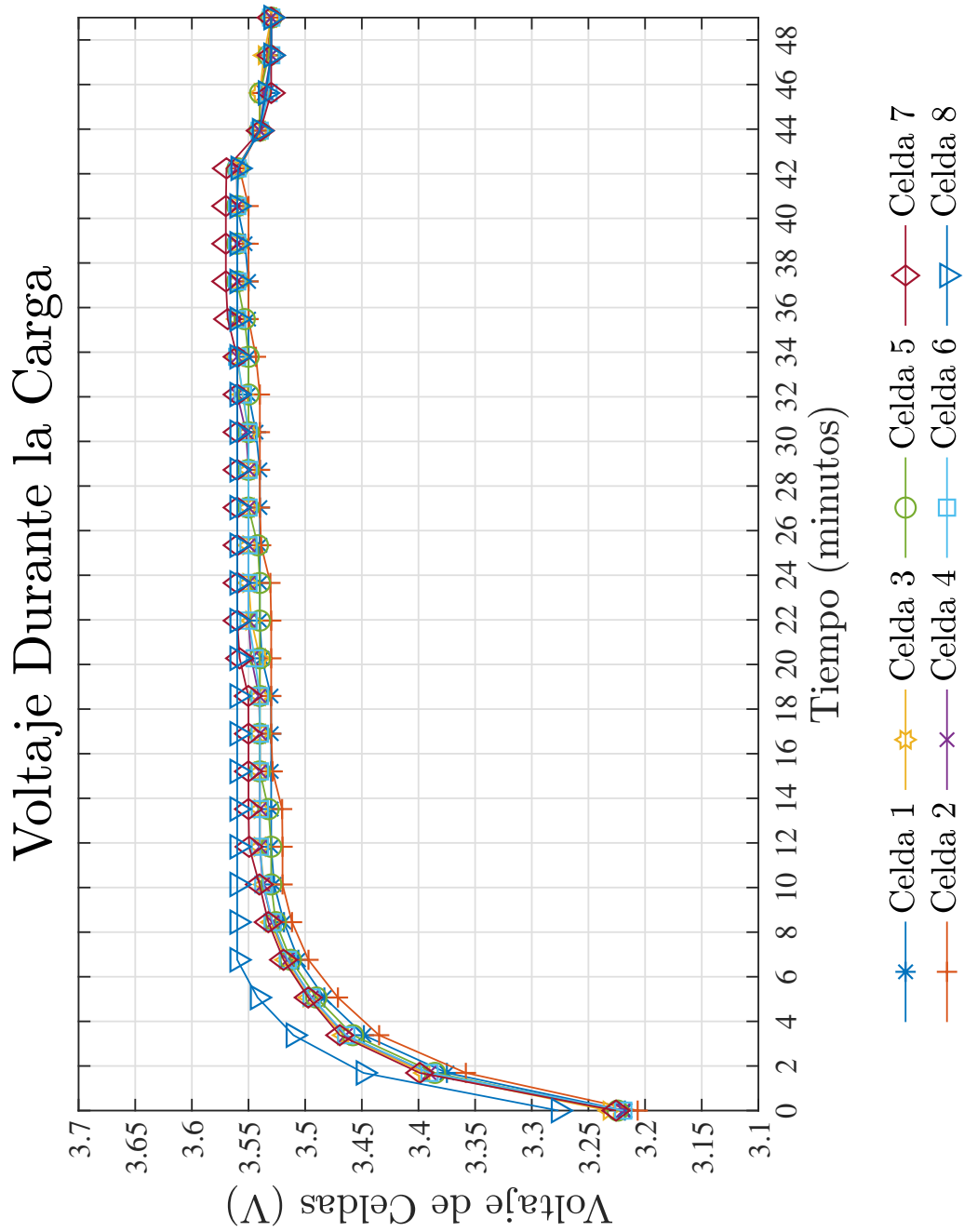


Figura F.7: Voltaje de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

## F.2.7. Corriente durante la Carga

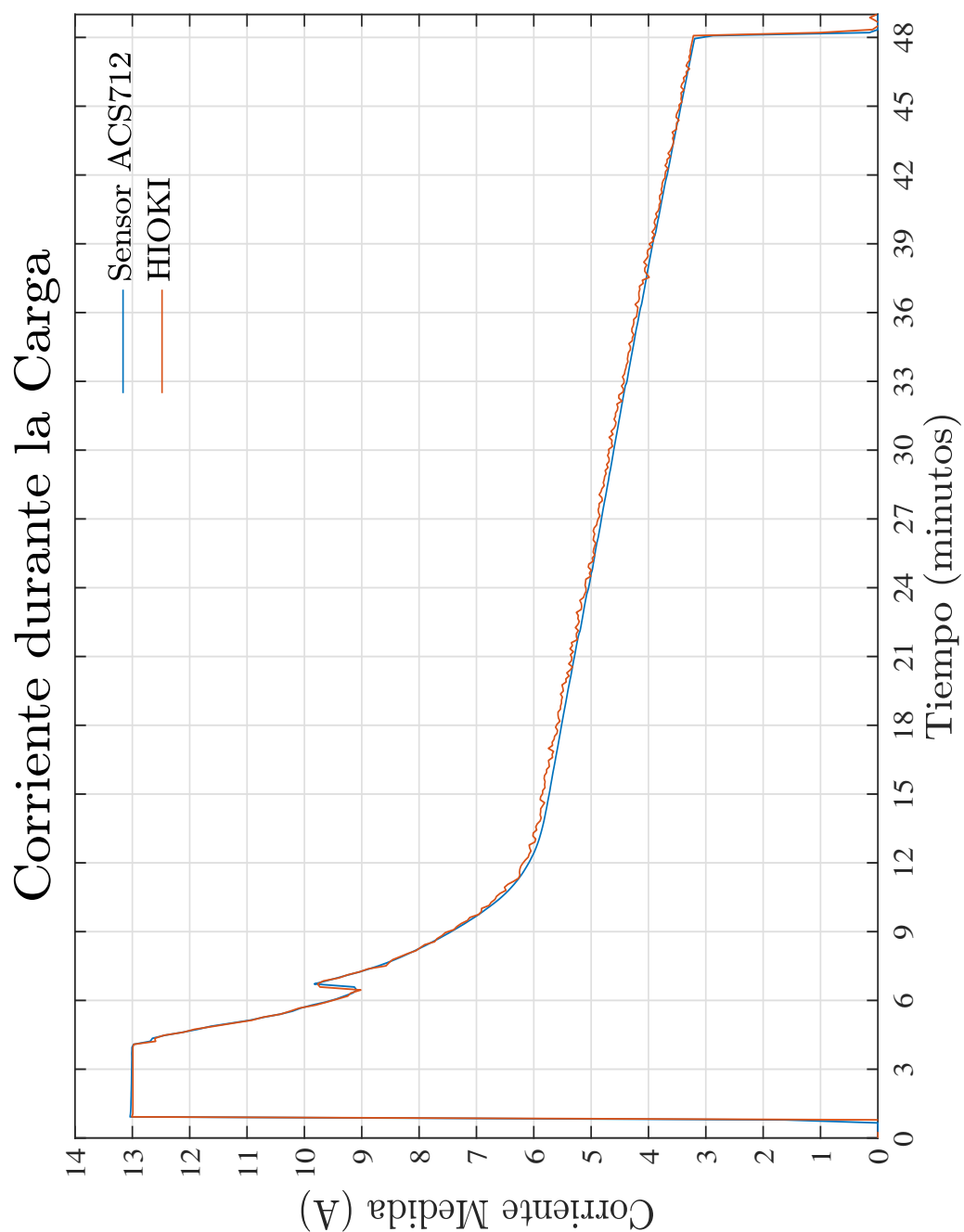


Figura F.8: Corriente de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

## F.2.8. Energía entregada por el Cargador PB-360P-24

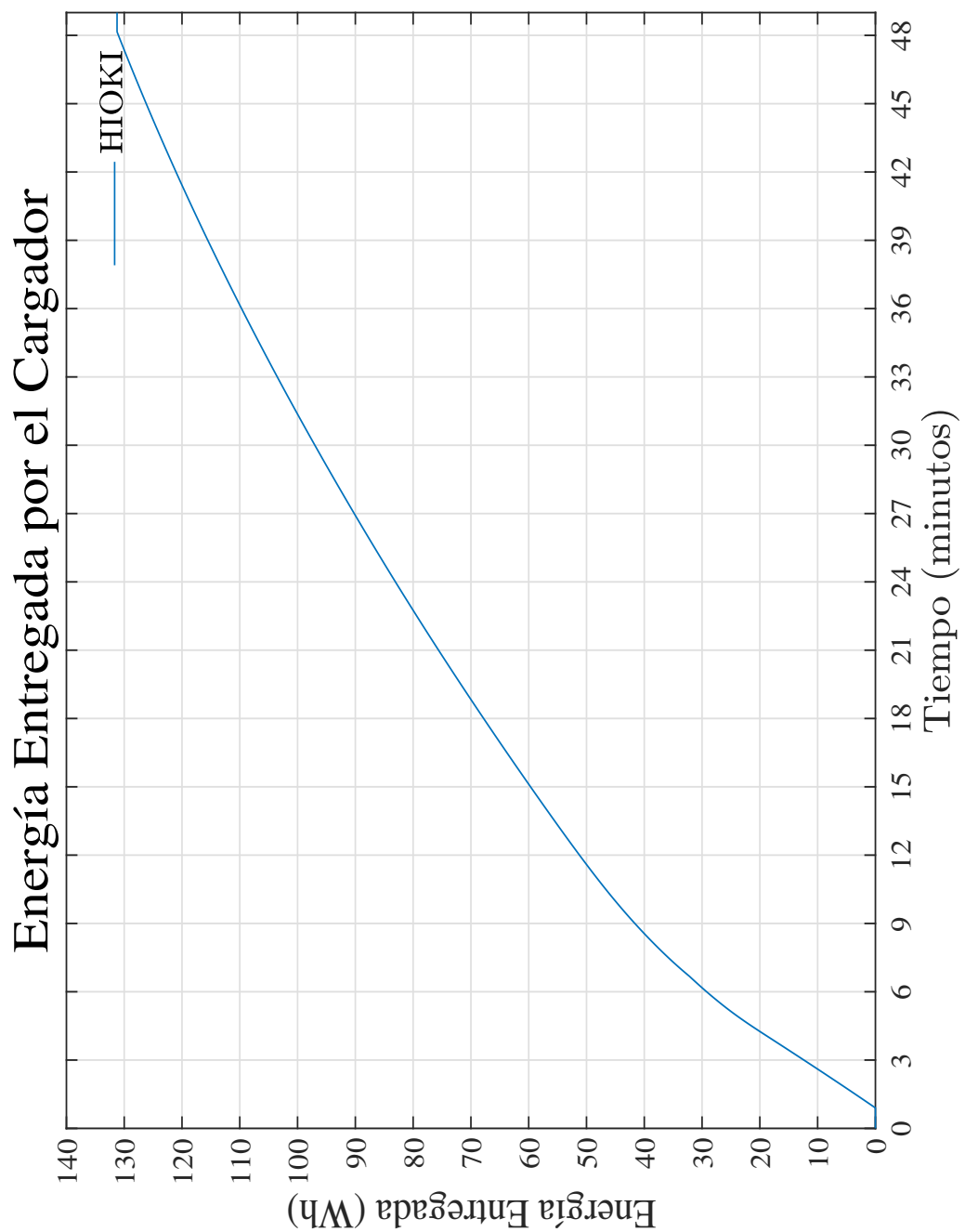


Figura F.9: Energía Entregada por Cargador

Fuente: Autores

### F.3. Resultados de la Segunda Prueba

#### F.3.1. Voltaje del Banco Durante la Descarga

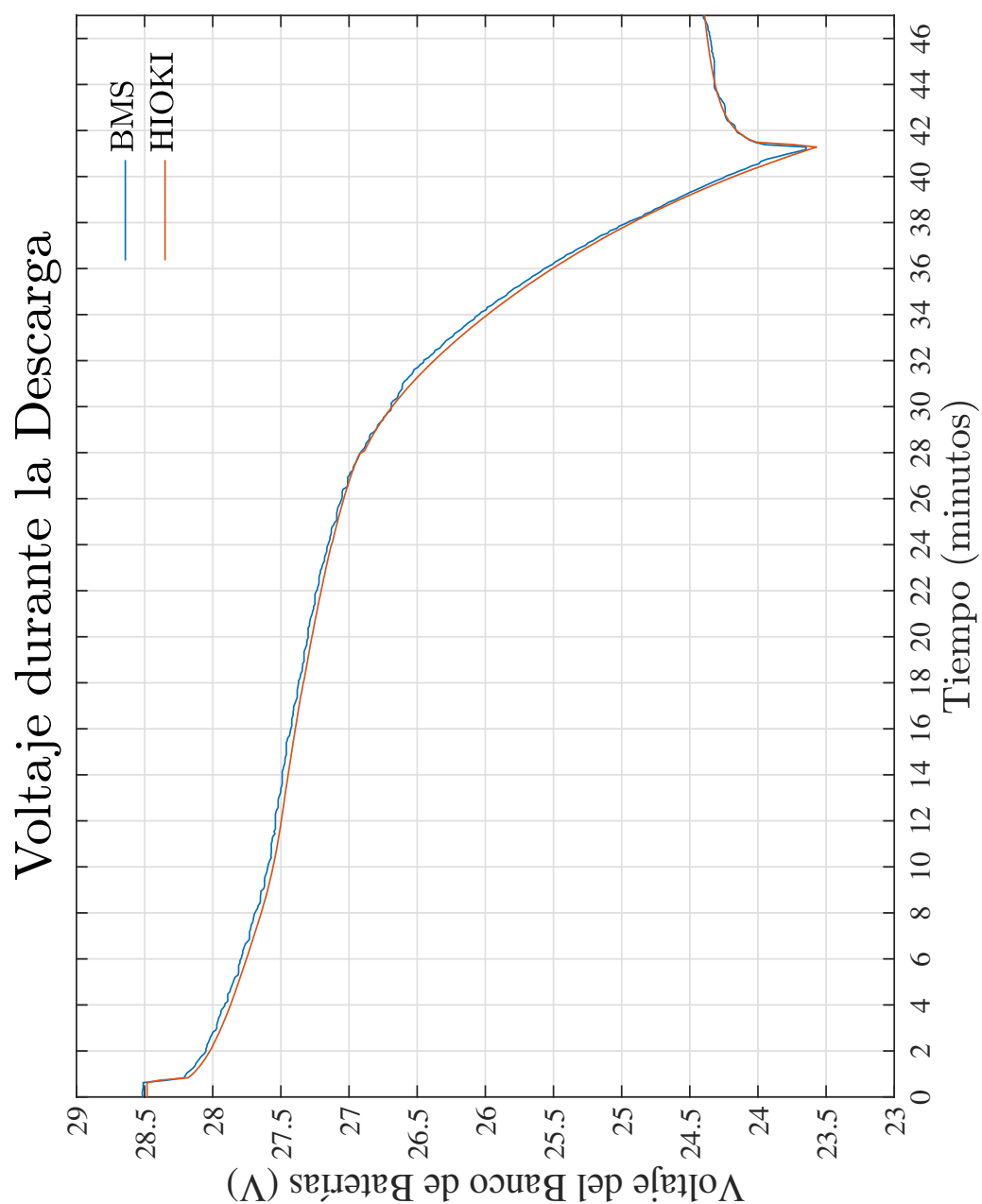


Figura F.10: Voltaje durante la Descarga

Fuente: Autores

### F.3.2. Voltaje de las Celdas durante la Descarga

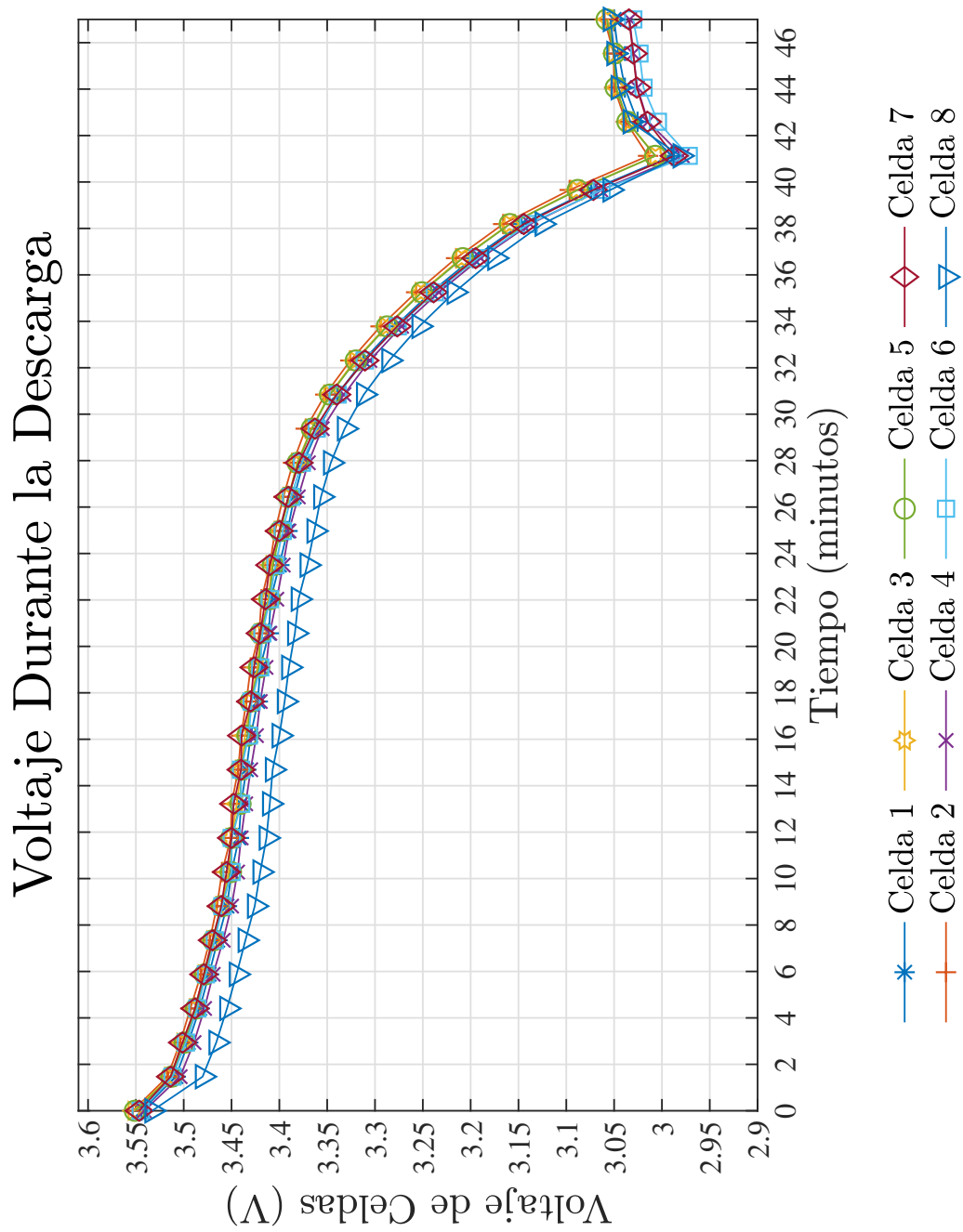


Figura F.11: Voltaje de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

### F.3.3. Corriente durante la Descarga

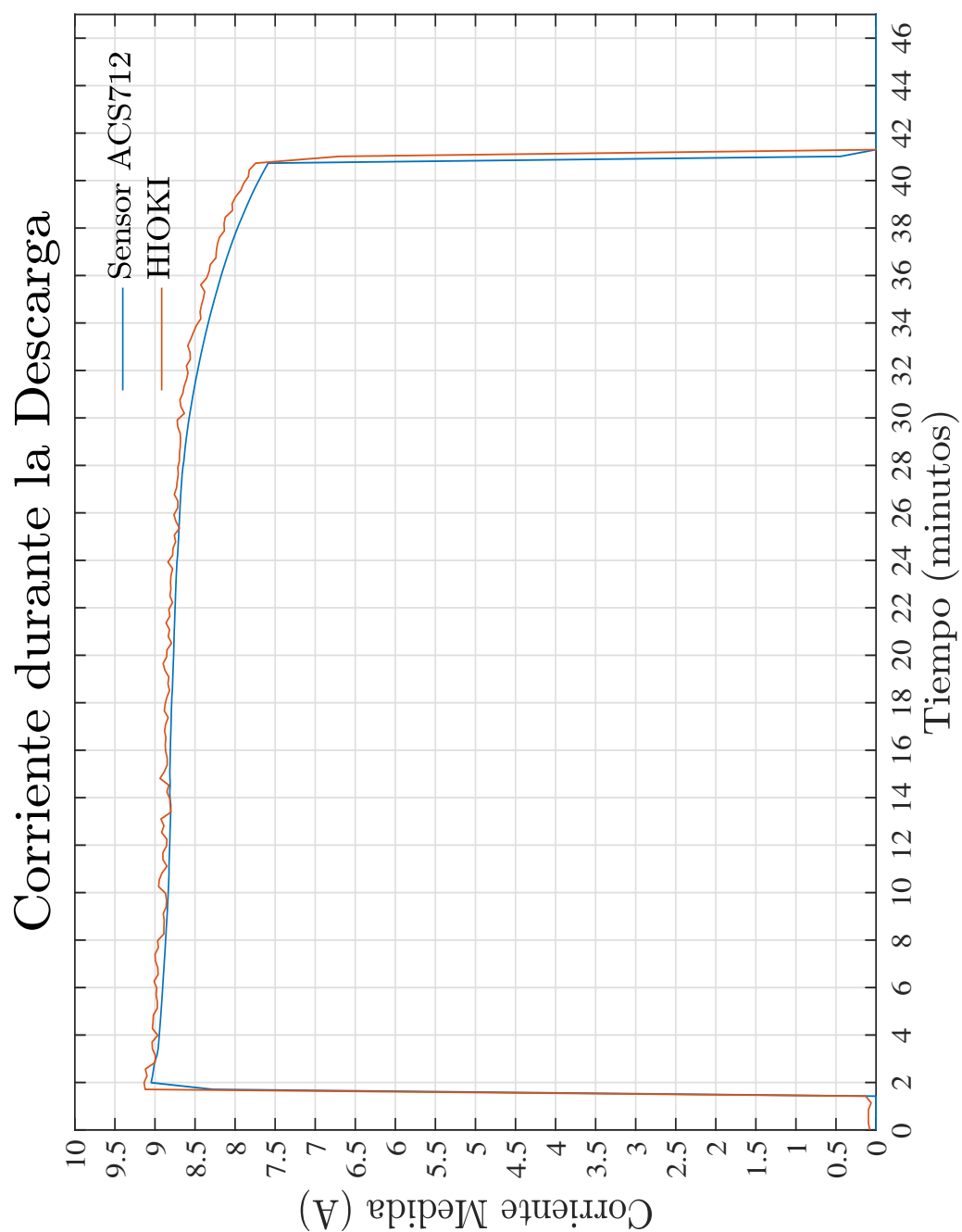


Figura F.12: Corriente de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

## F.3.4. Energía entregada por el Banco de Baterías

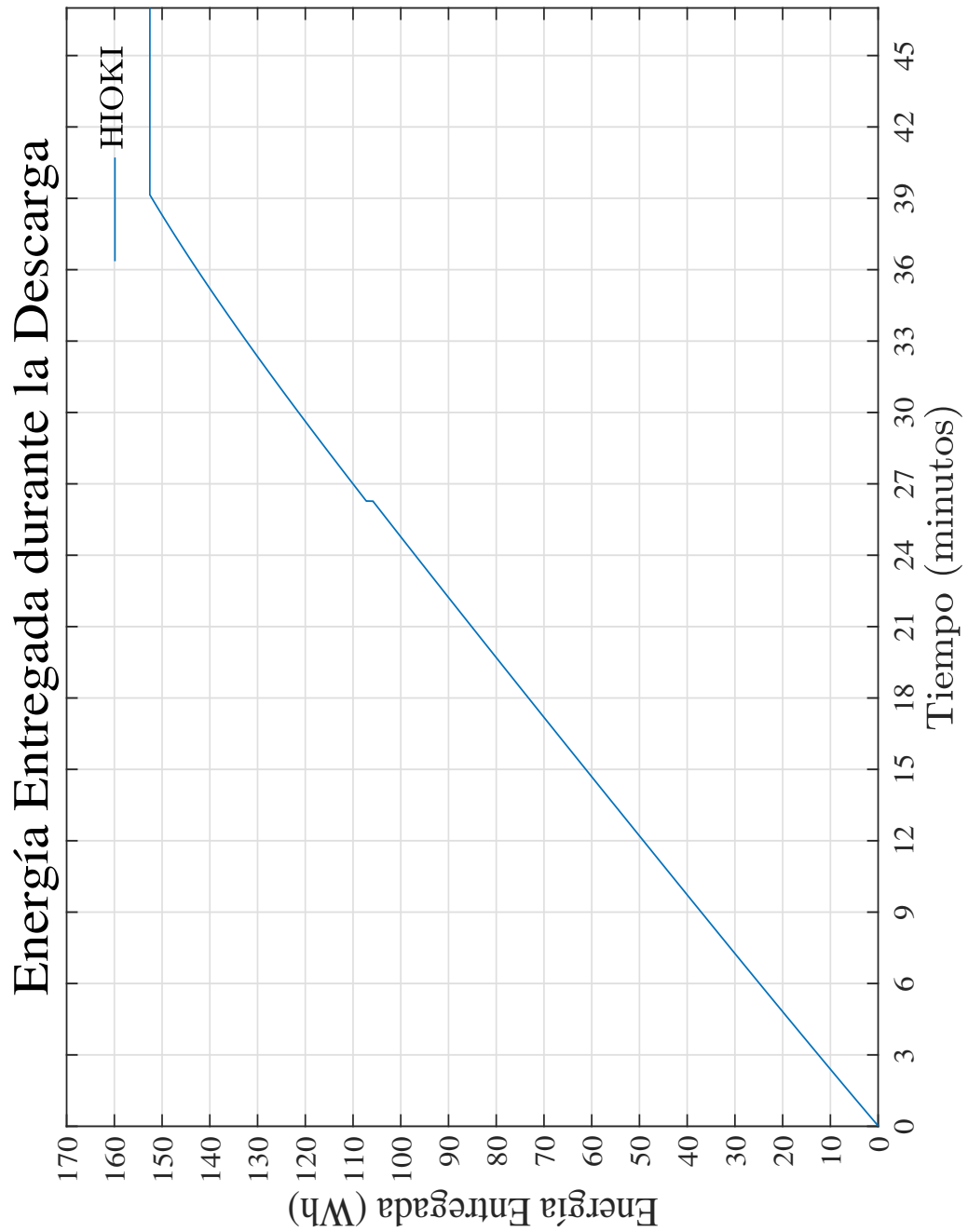


Figura F.13: Energía Entregada por el Banco de Baterías

Fuente: Autores



## F.3.5. Voltaje del Banco Durante la Carga

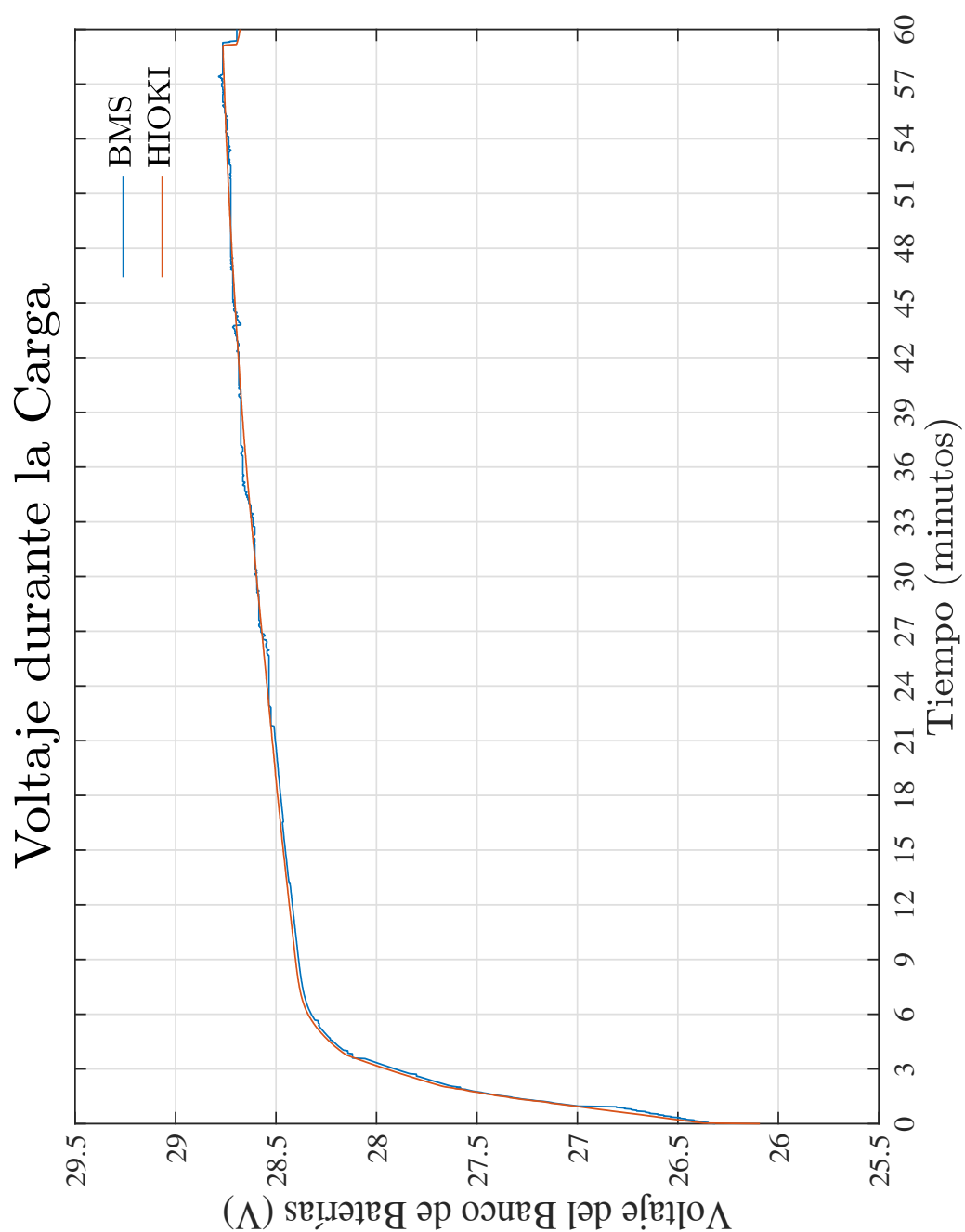


Figura F.14: Voltaje Durante la Carga

Fuente: Autores

### F.3.6. Voltaje de las Celdas durante la Carga

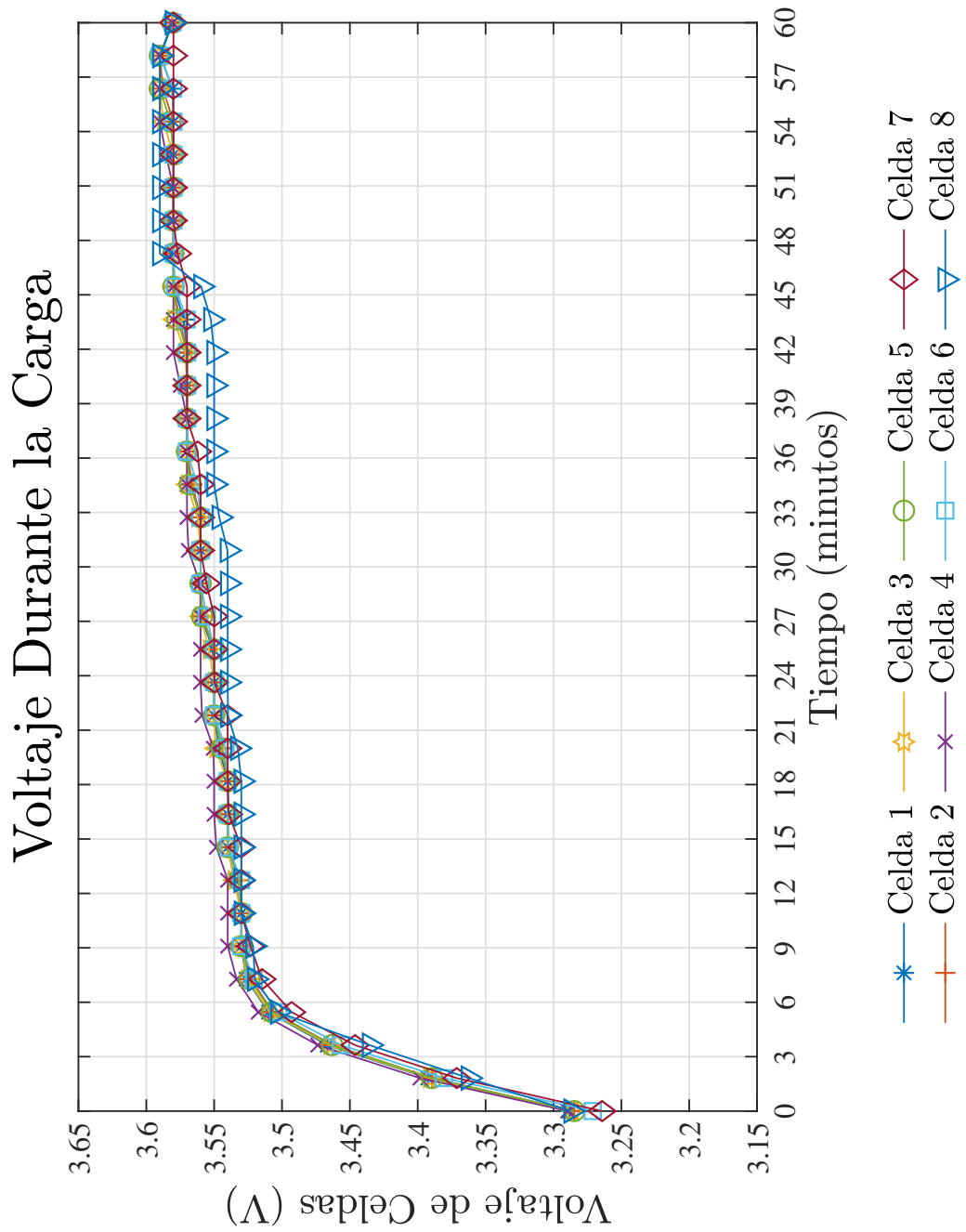


Figura F.15: Voltaje de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

## F.3.7. Corriente durante la Carga

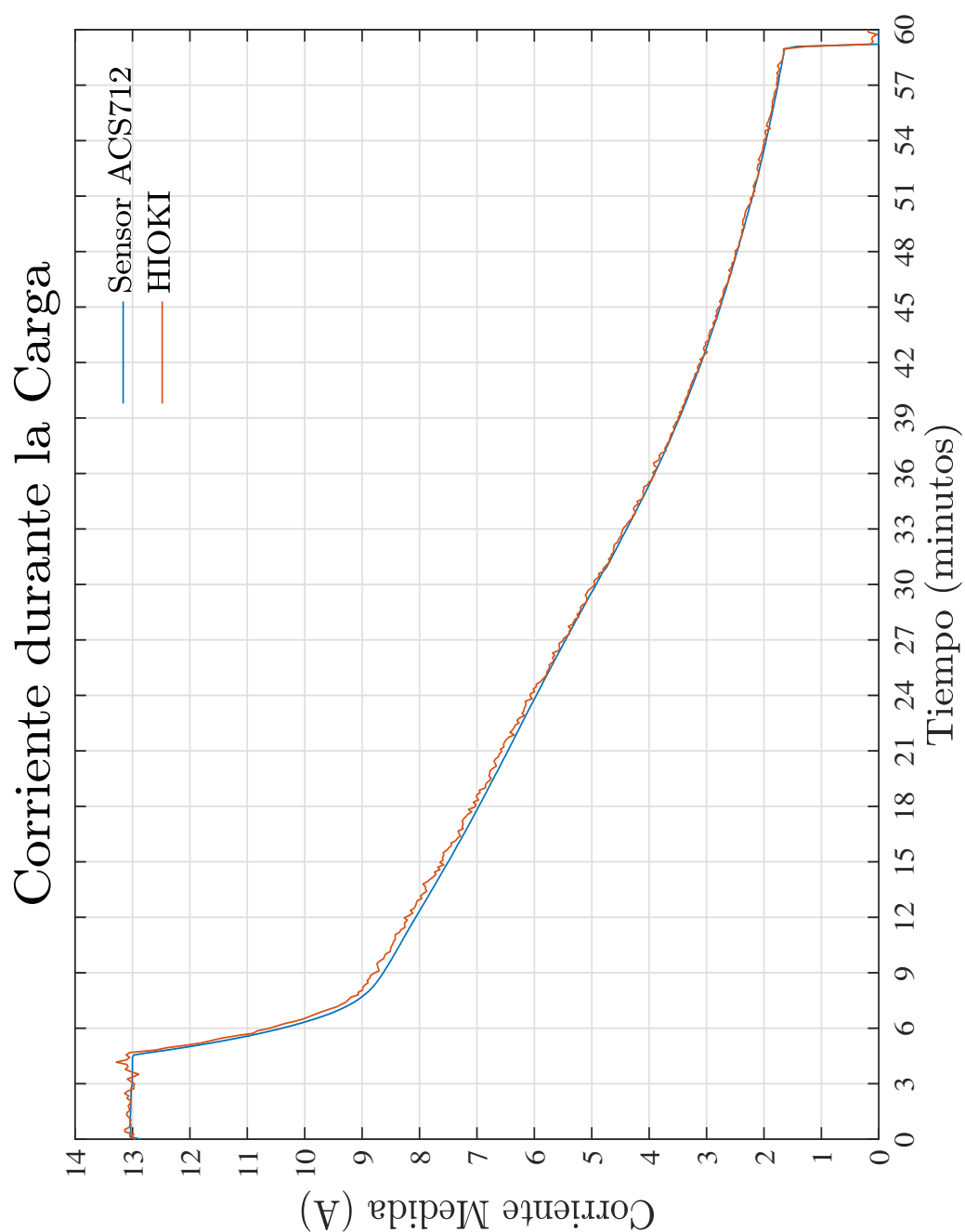


Figura F.16: Corriente de Celdas durante la Carga

Fuente: Autores

## F.3.8. Energía entregada por el Cargador PB-360P-24

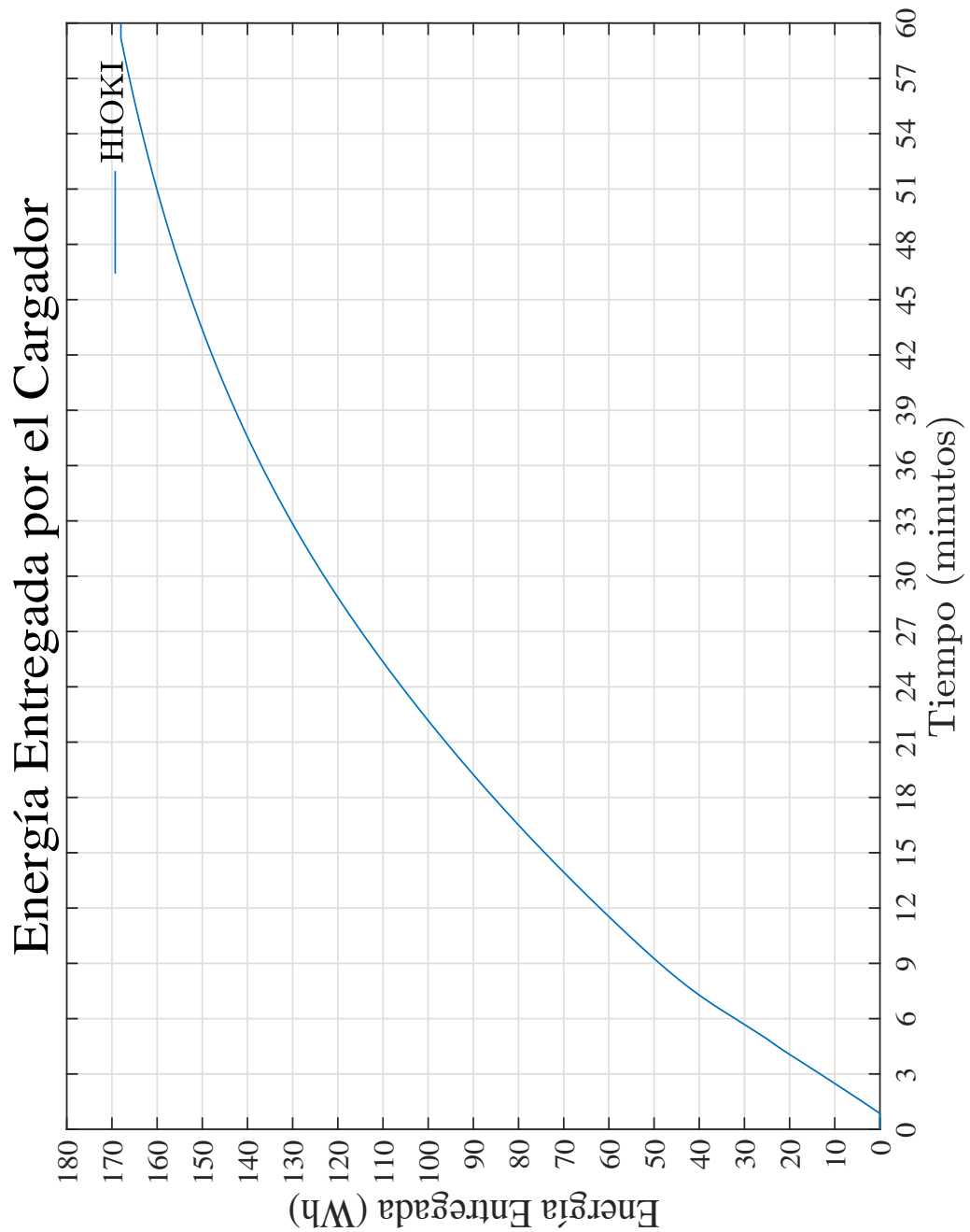


Figura F.17: Energía Entregada por Cargador

Fuente: Autores



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
*desde 1867*

## F.4. Resultados de la Tercera Prueba

### F.4.1. Voltaje del Banco Durante la Carga

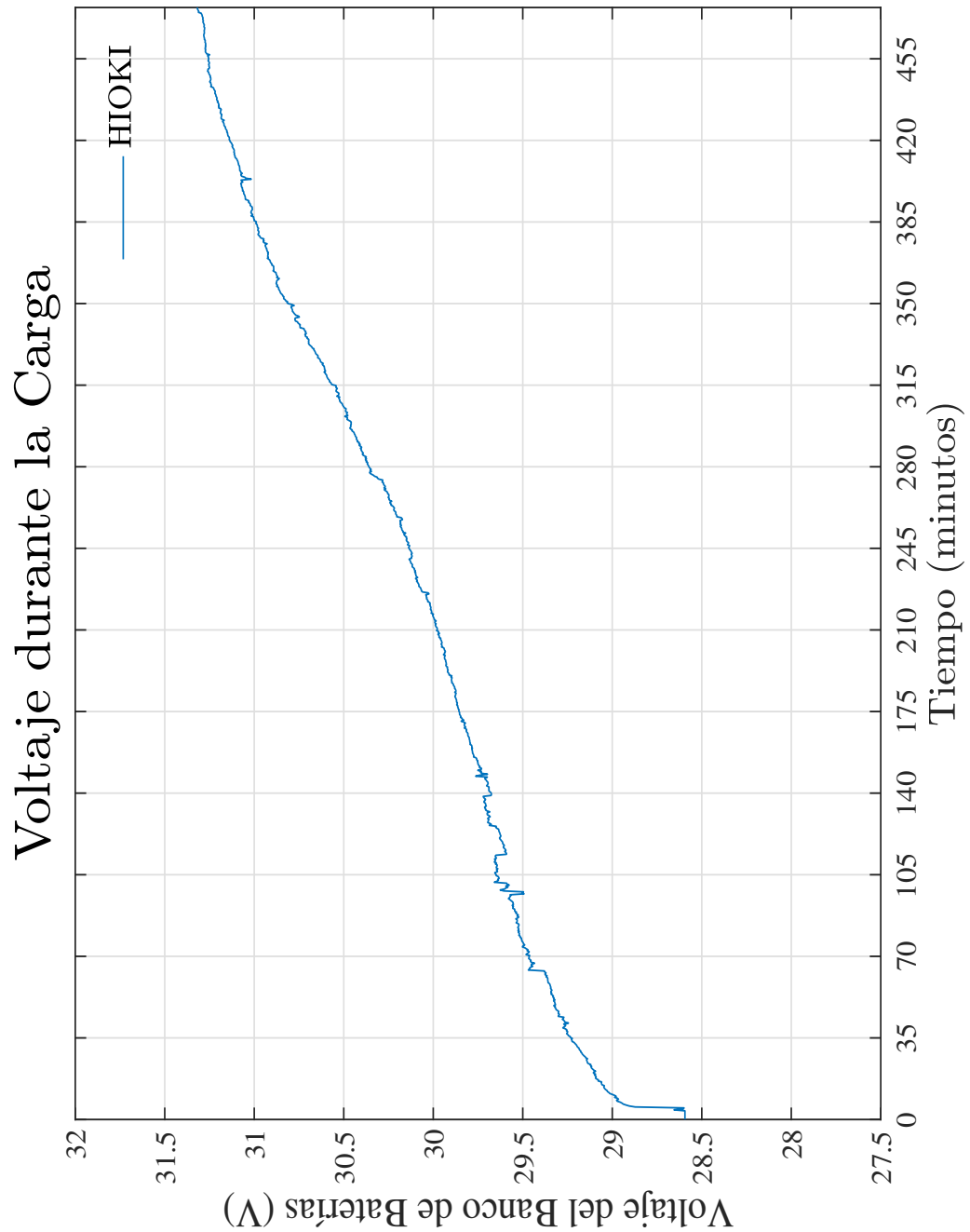


Figura F.18: Voltaje Durante la Carga

Fuente: Autores

## F.4.2. Corriente durante la Carga

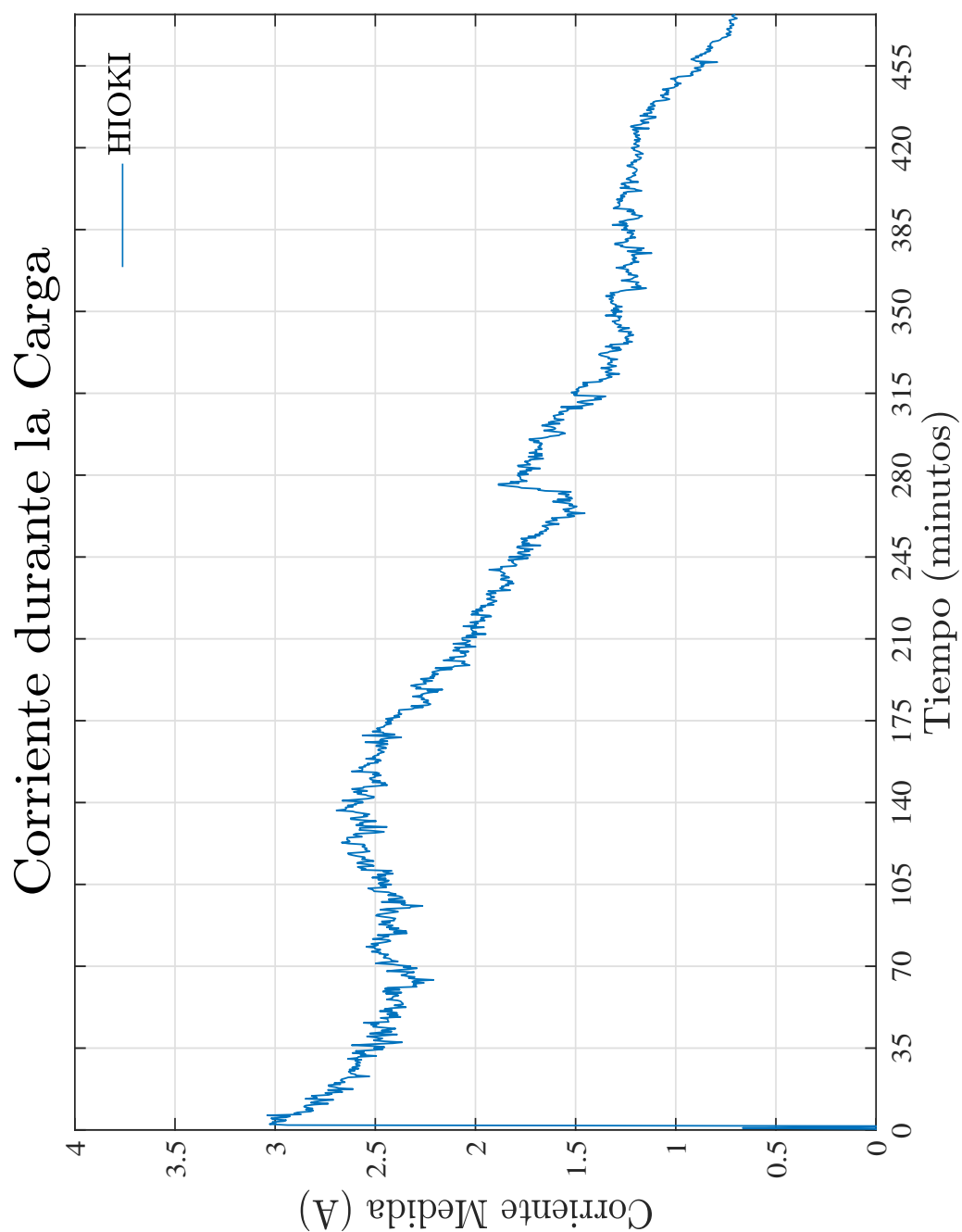


Figura F.19: Corriente del Banco durante la Carga

Fuente: Autores

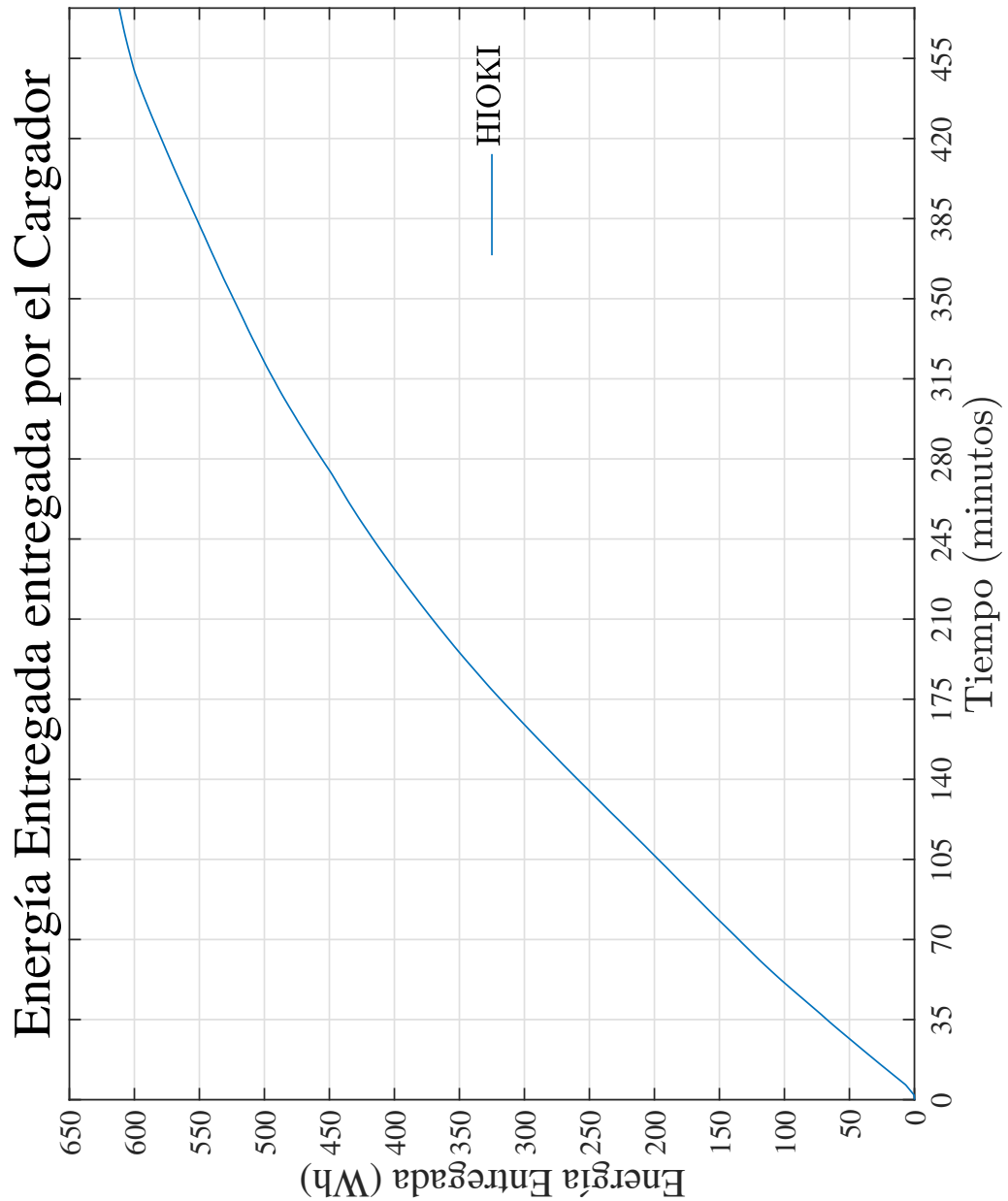
**F.4.3. Energía entregada por la fuente DE LORENZO DL 1059**

Figura F.20: Energía Entregada por la Fuente DE LORENZO DL 1059

Fuente: Autores



## F.4.4. Amperios hora durante la Carga

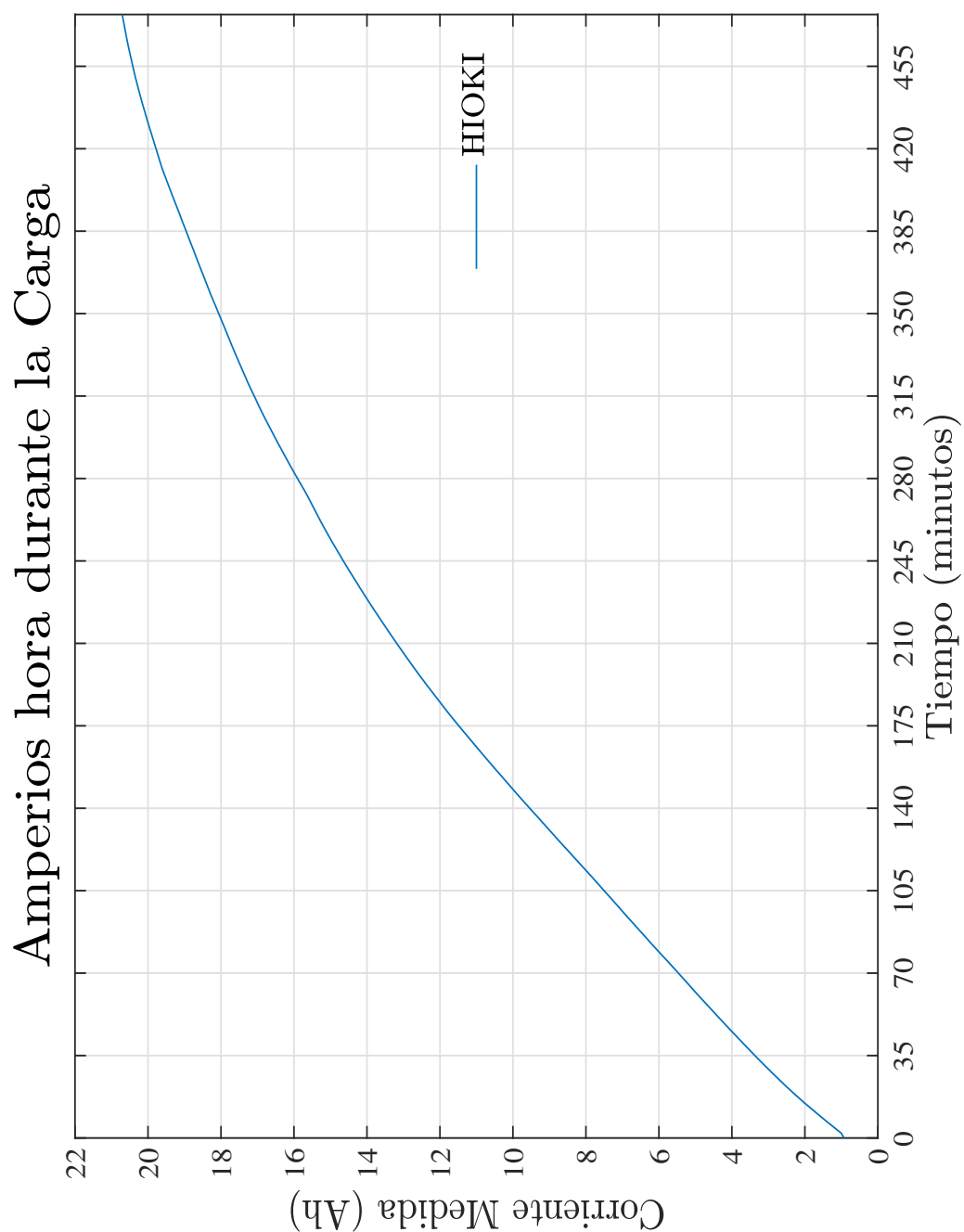


Figura F.21: Amperios hora durante la Carga

Fuente: Autores

#### F.4.5. Voltaje del Banco Durante la Descarga

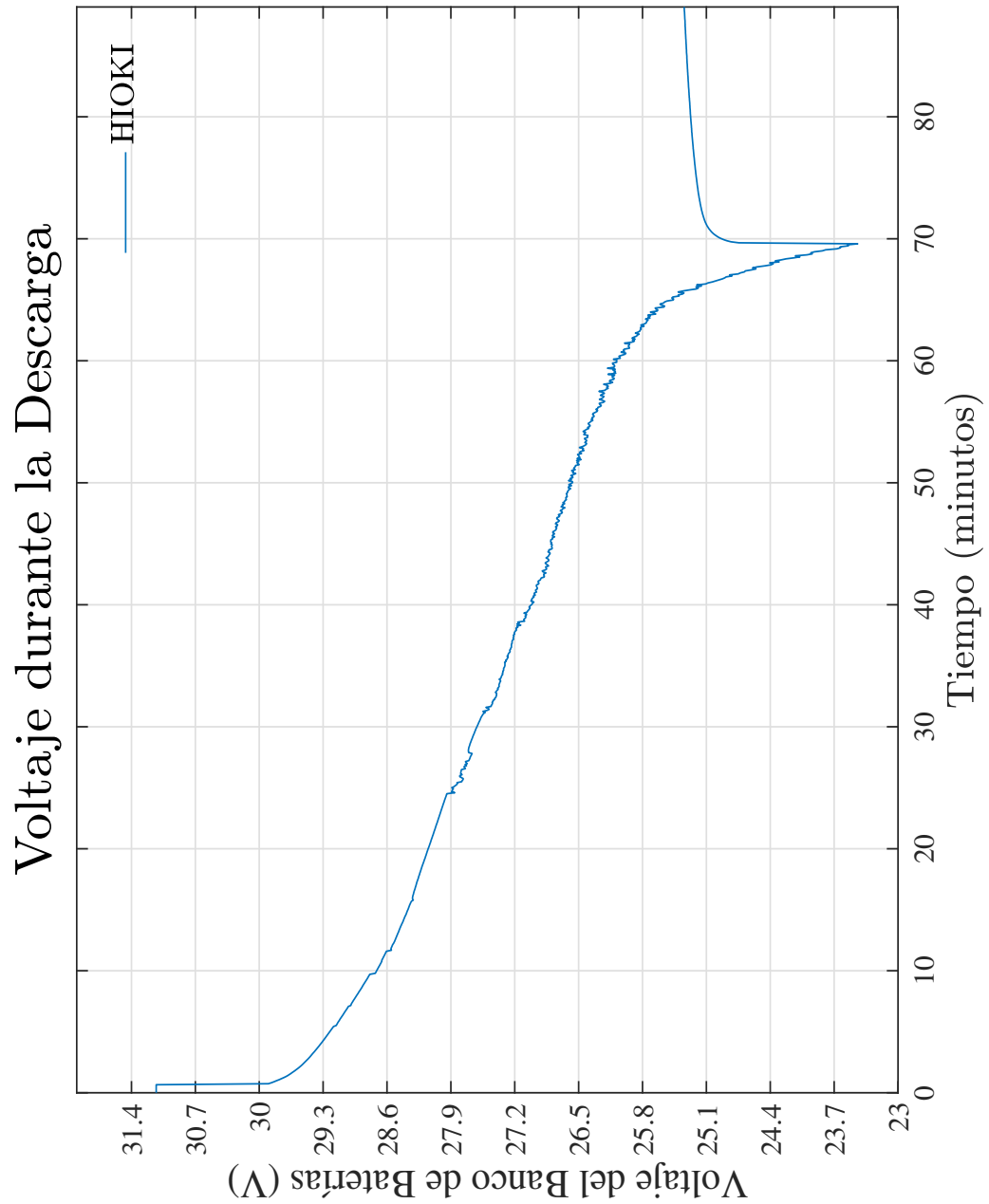


Figura F.22: Voltaje durante la Descarga

Fuente: Autores

## F.4.6. Corriente durante la Descarga

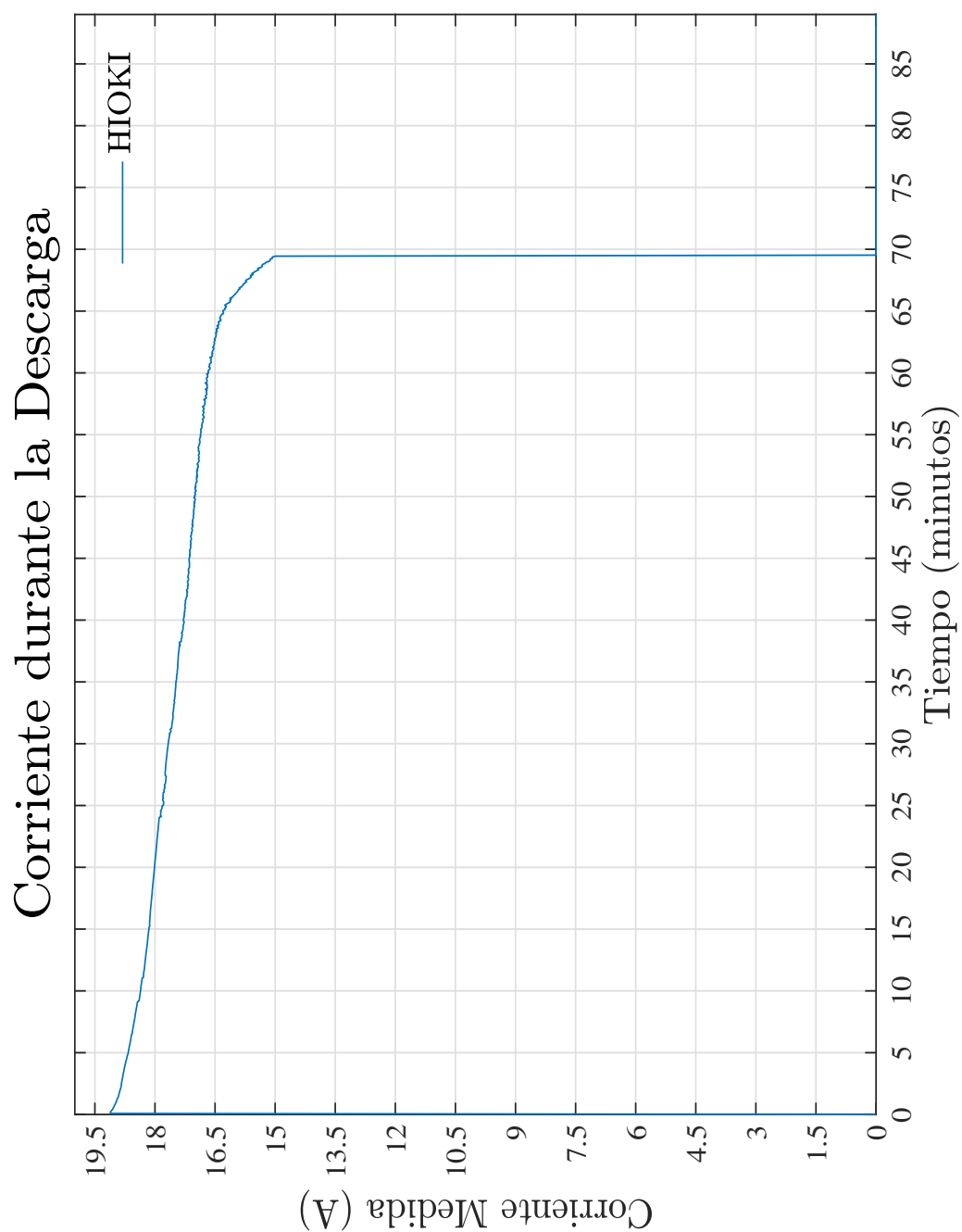


Figura F.23: Corriente de Celdas durante la Descarga

Fuente: Autores

## F.4.7. Energía entregada por el Banco de Baterías

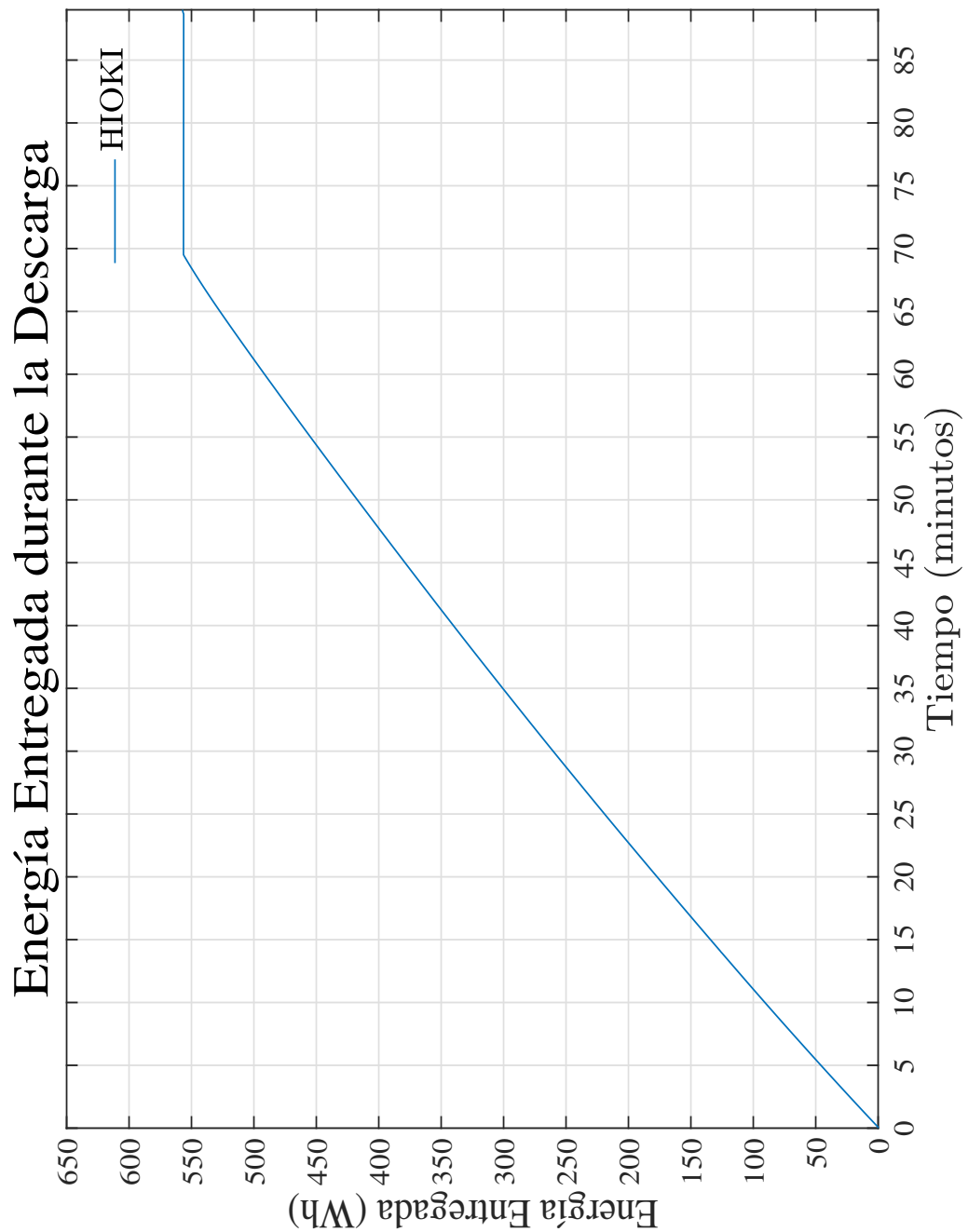


Figura F.24: Energía Entregada por el Banco de Baterías

Fuente: Autores

## F.4.8. Amperios hora durante la Descarga

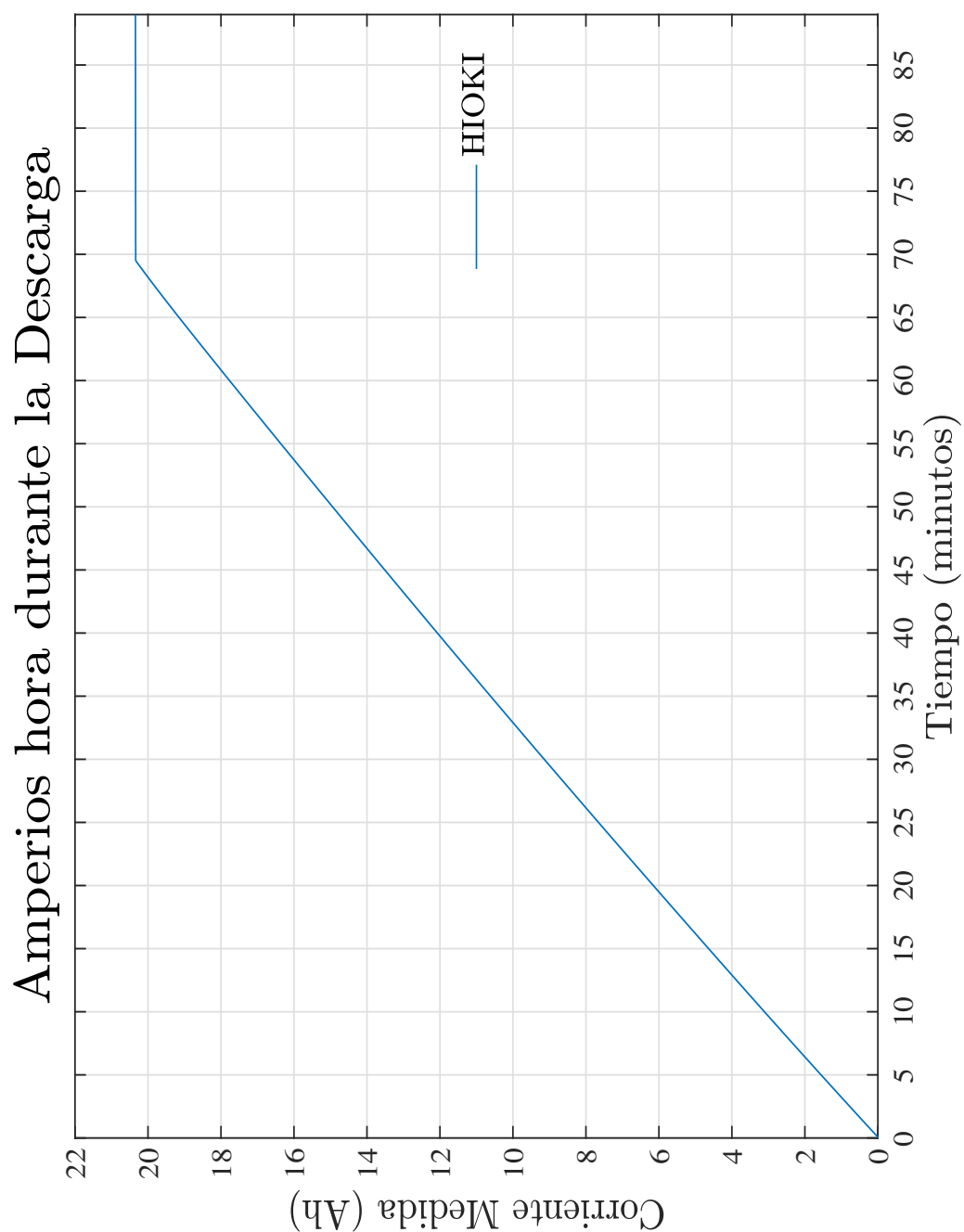


Figura F.25: Amperios hora durante la Descarga

Fuente: Autores



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
*desde 1867*

## F.5. Consumo energético del exoesqueleto

### F.5.1. Voltaje del Banco Durante la Carga

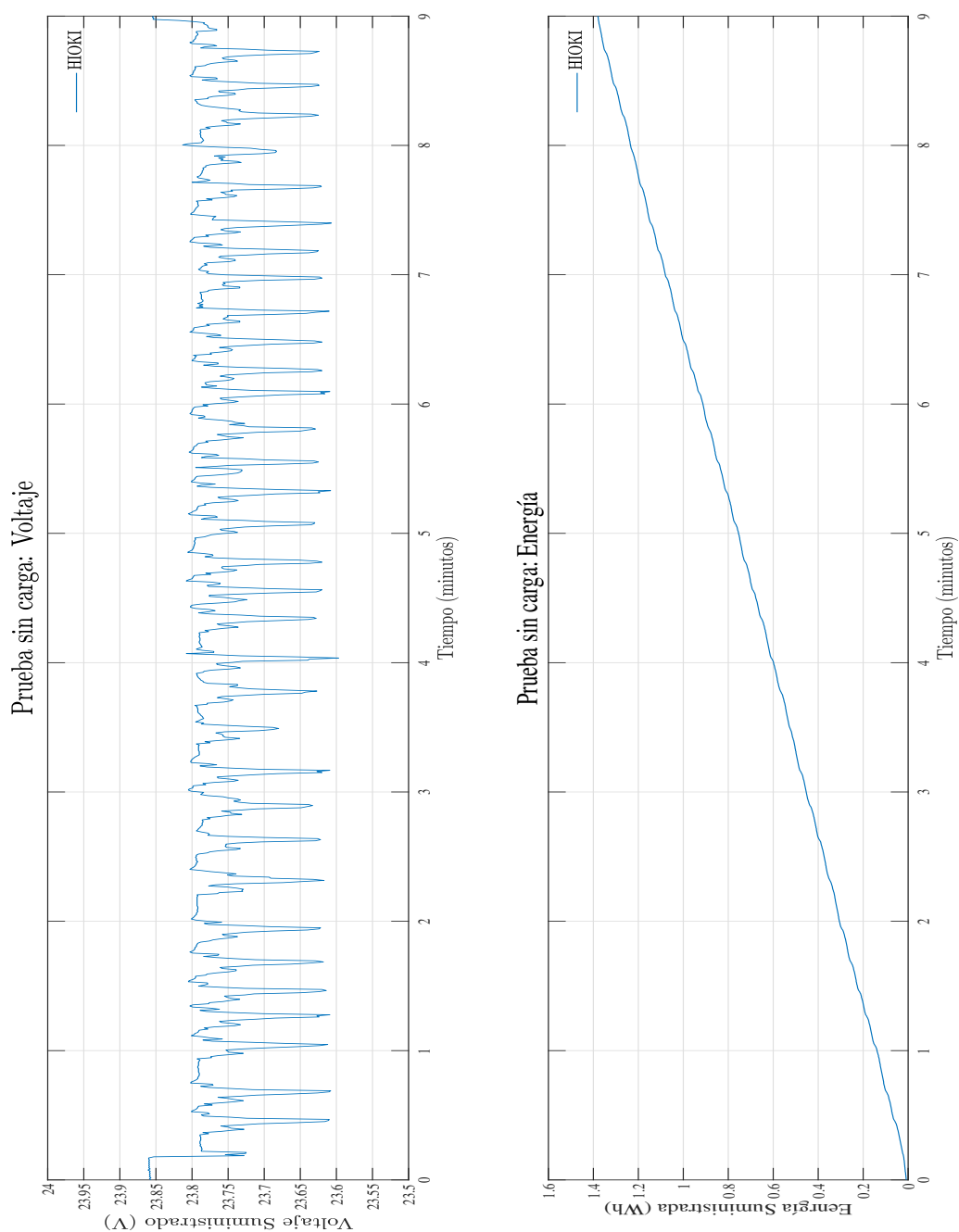


Figura F.26: Voltaje durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

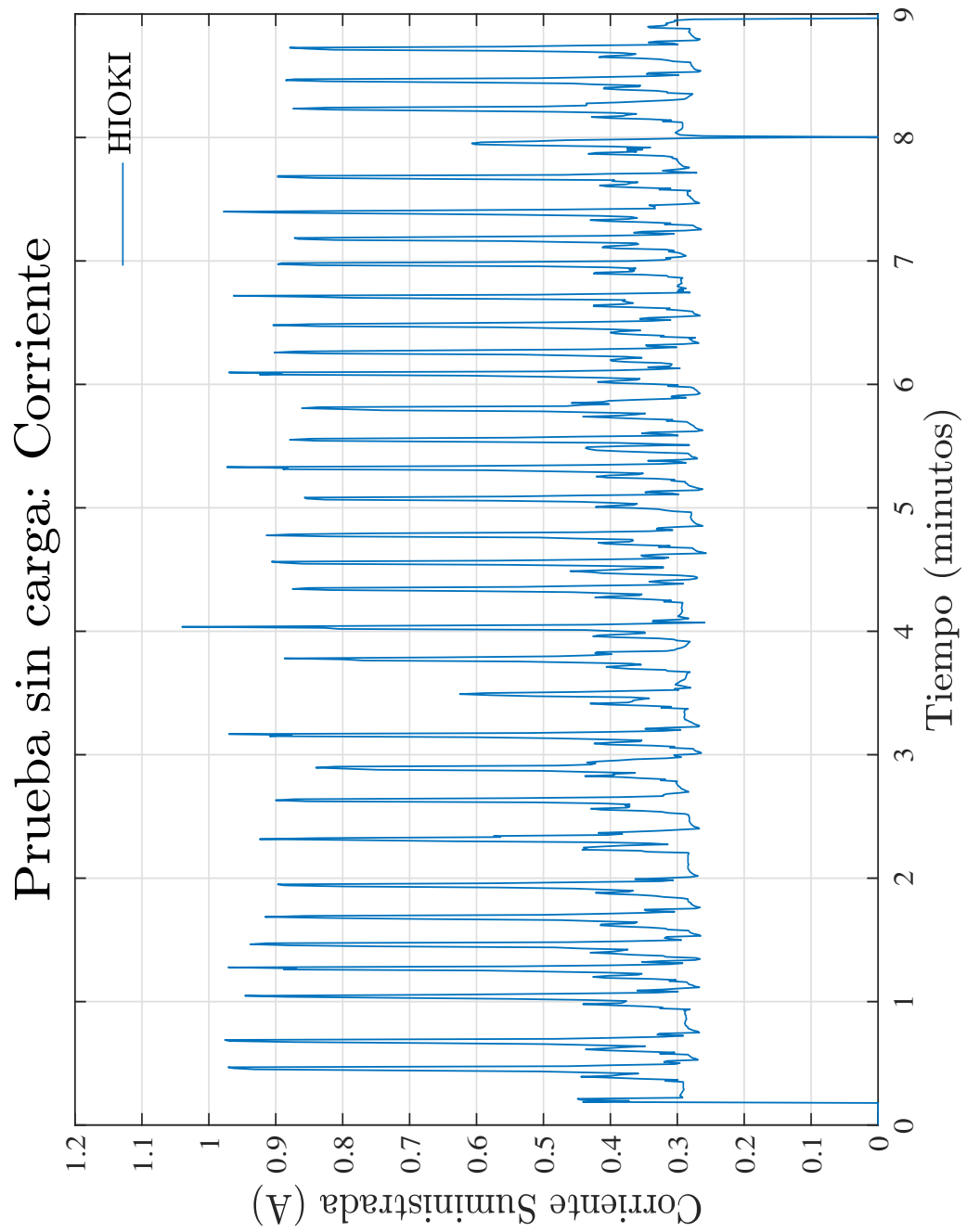


Figura F.27: Corriente durante la prueba sin carga

Fuente: Autores



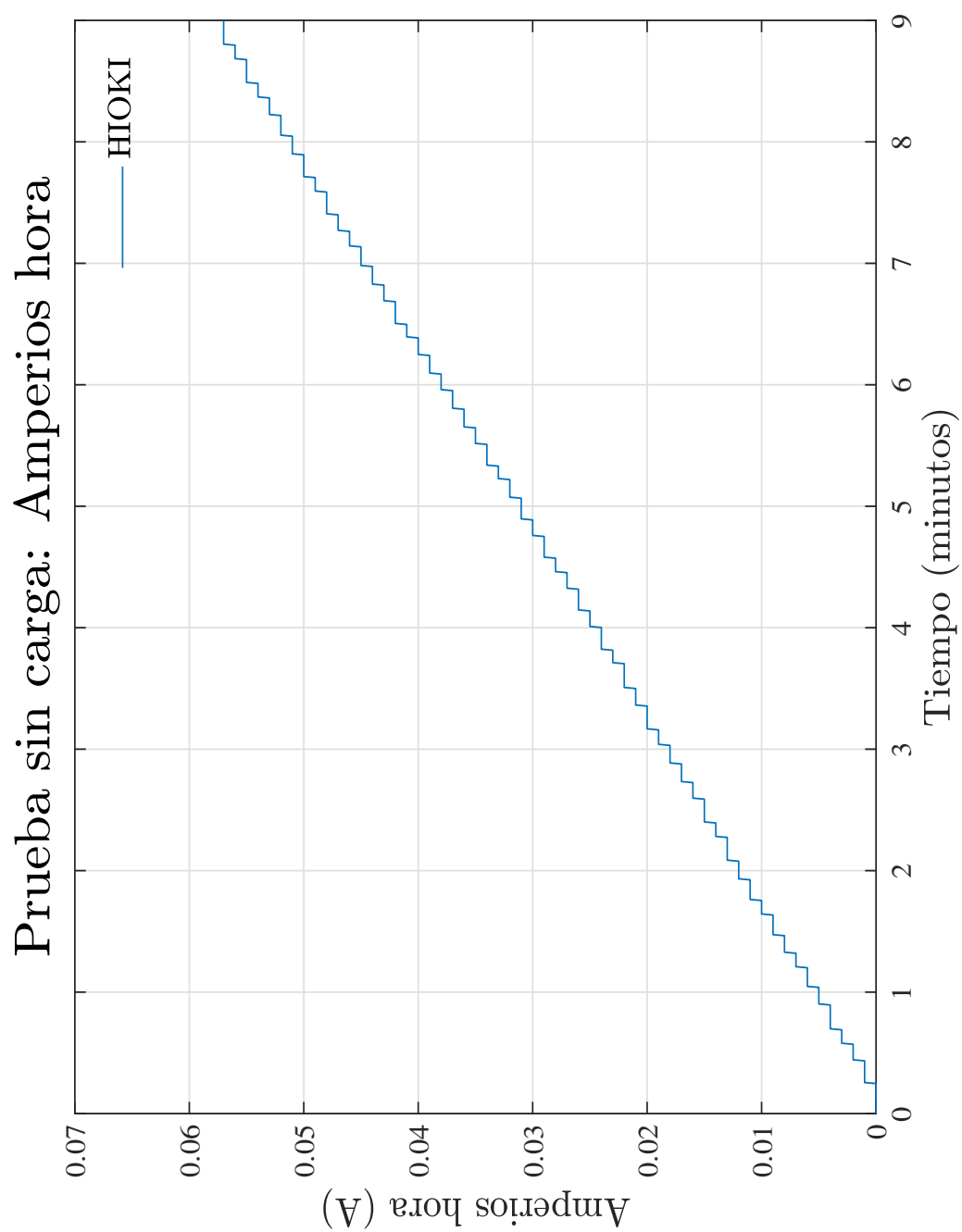


Figura F.28: Amperios hora durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

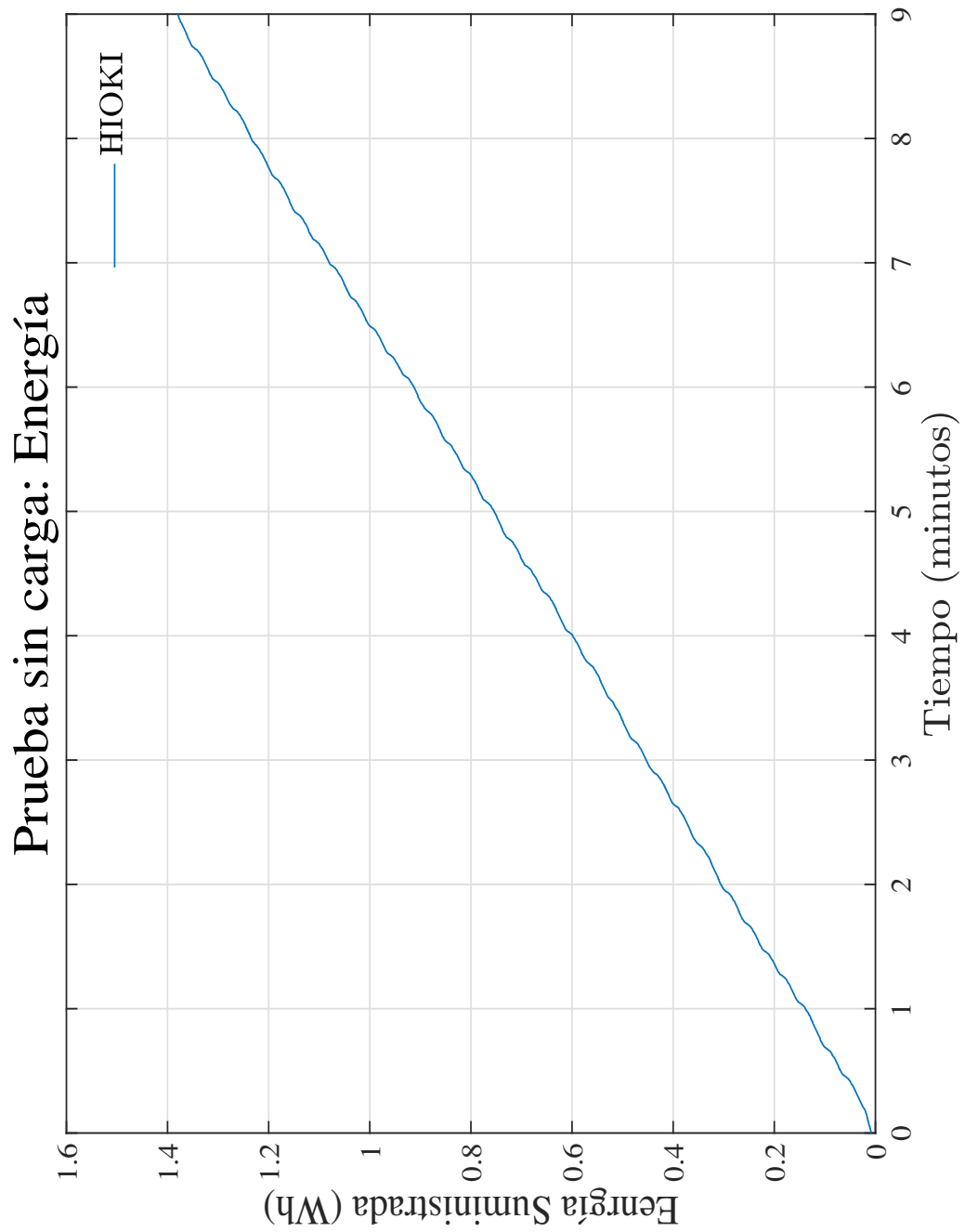


Figura F.29: Energía durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

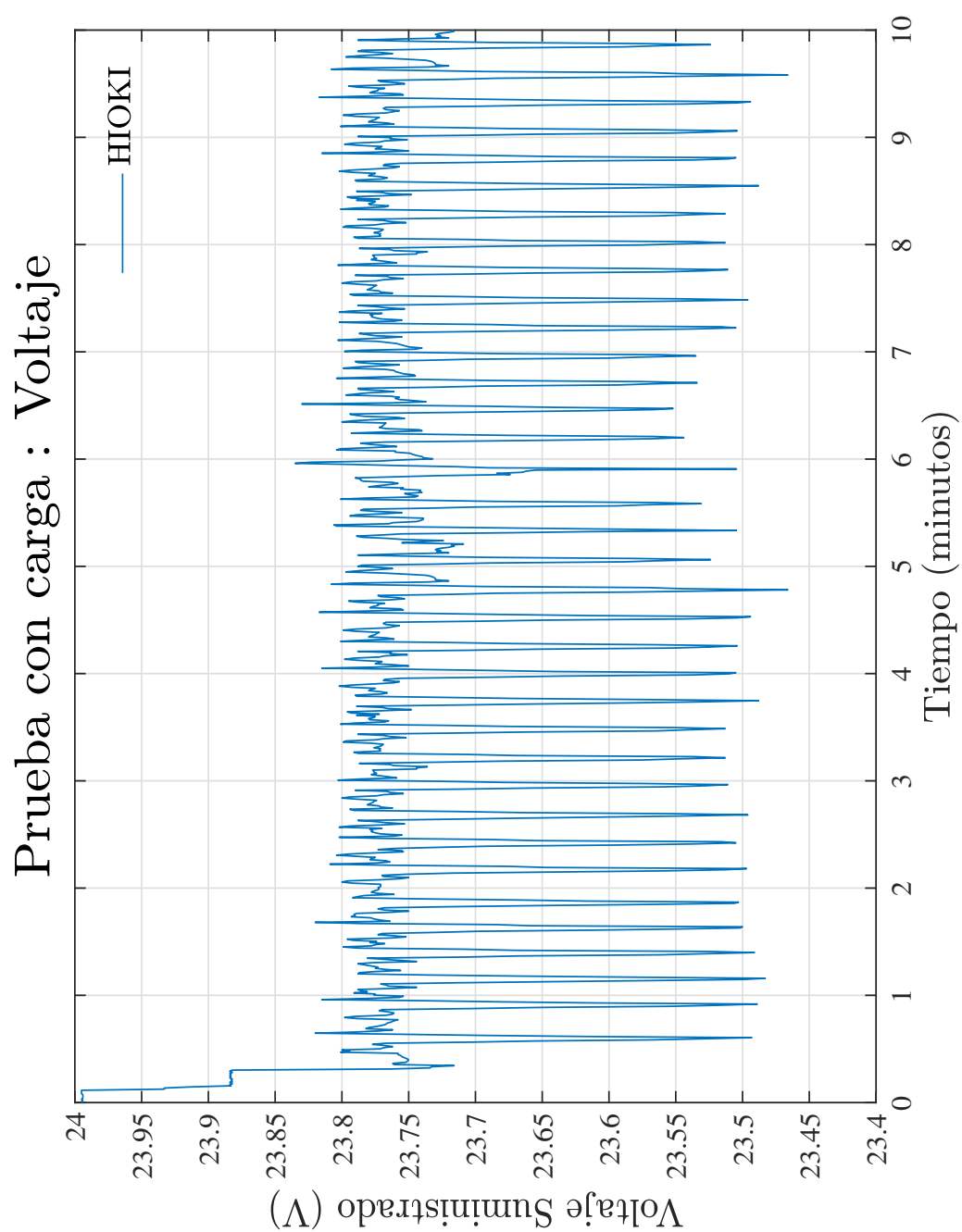


Figura F.30: Voltaje durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

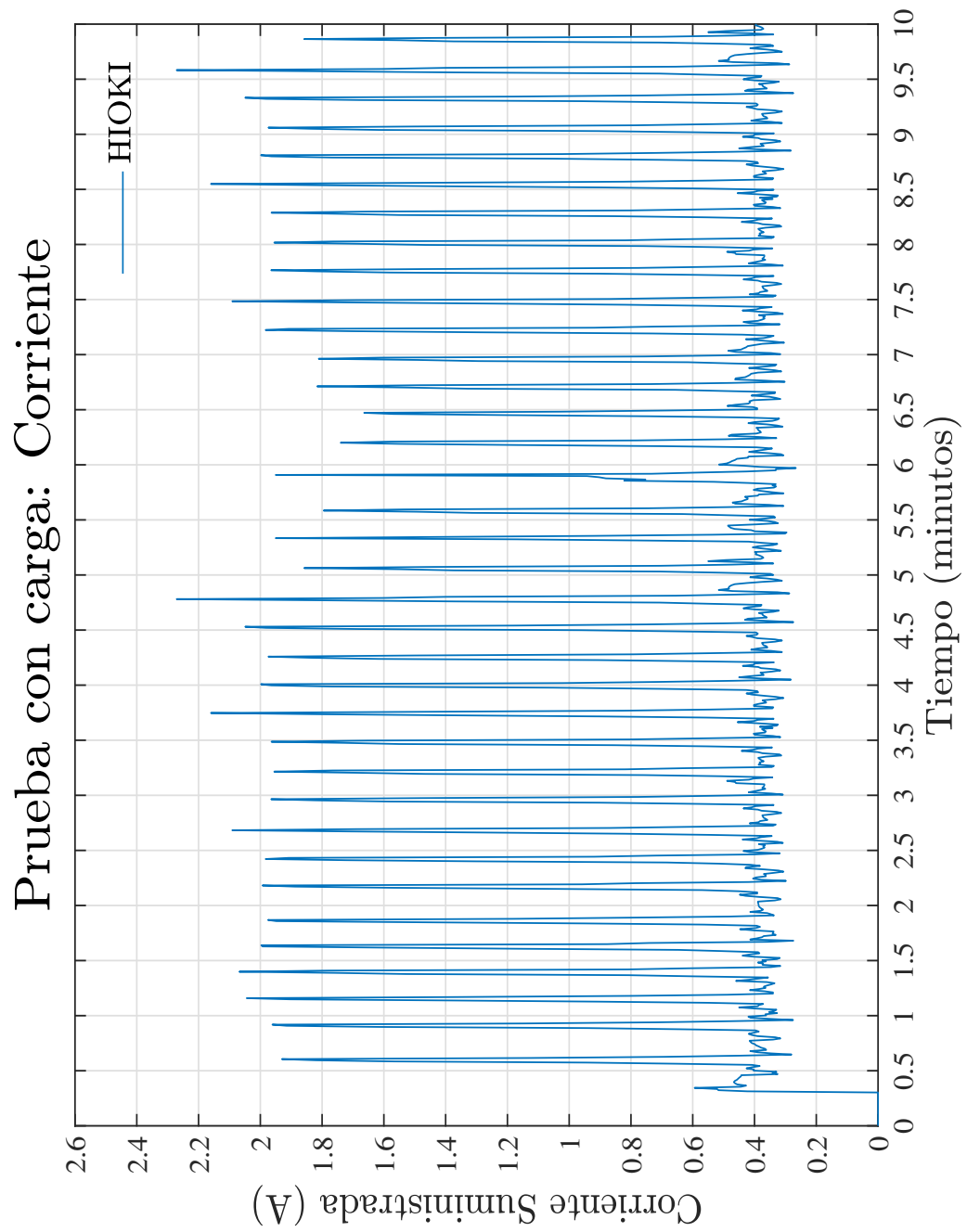


Figura F.31: Corriente durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

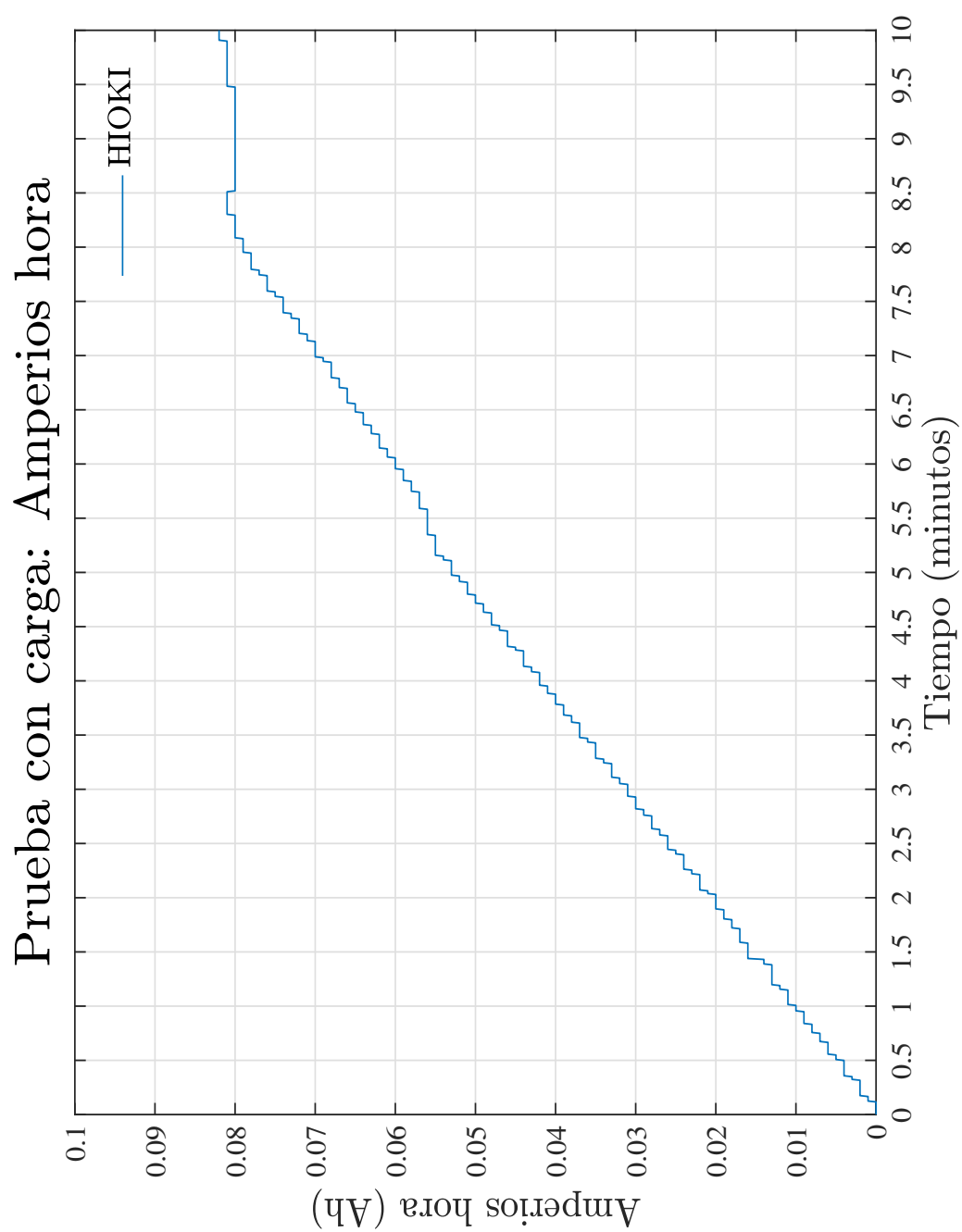


Figura F.32: Amperios hora durante la prueba sin carga

Fuente: Autores

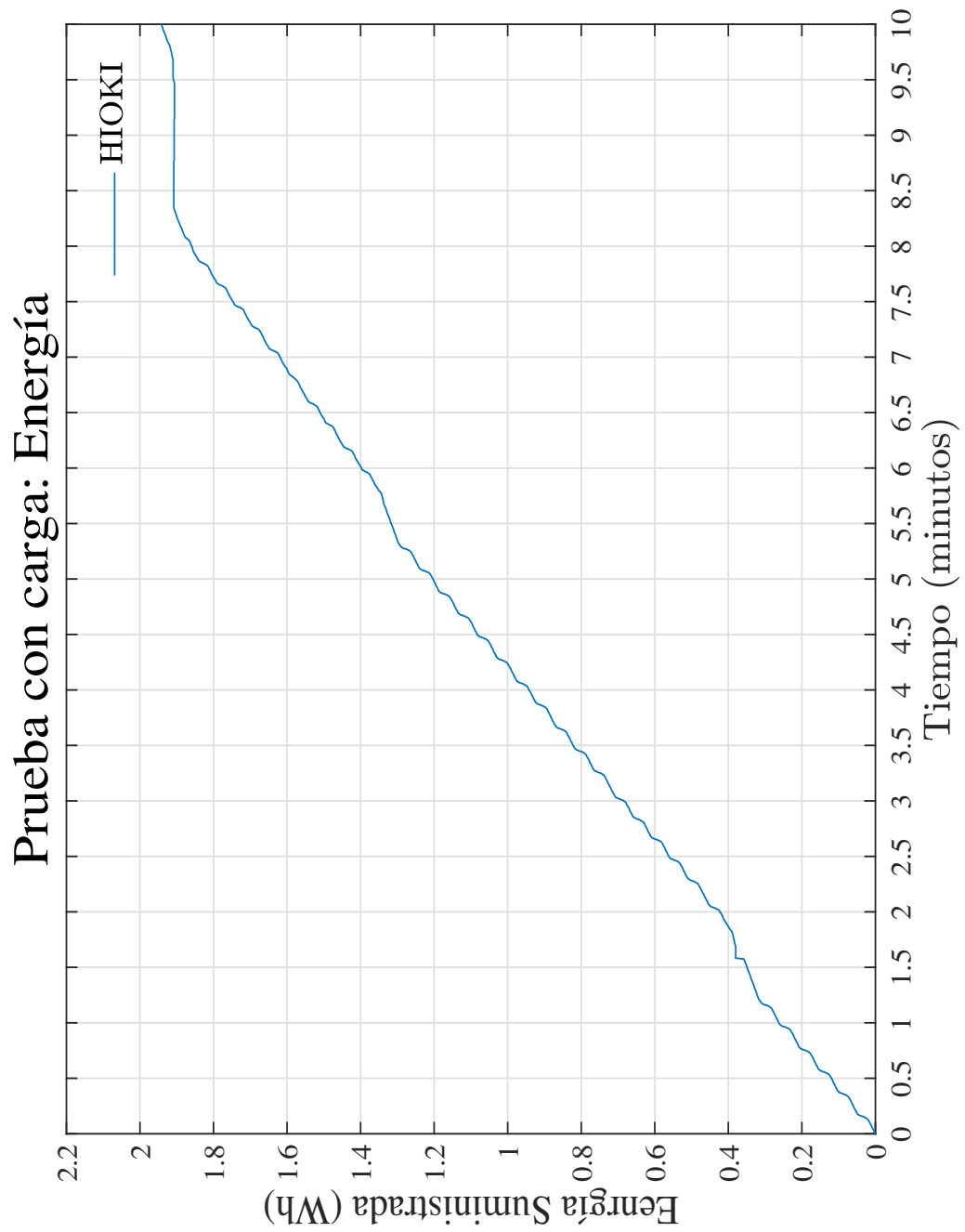


Figura F.33: Energía durante la prueba sin carga

Fuente: Autores



## Anexo G

# Análisis de Costo Estimado

Para determinar el costo estimado de la fabricación del sistema se obtuvo una lista con todos los material y dispositivos usados en el Sistema de Gestión de energía. El costo a estimar se basa en la construcción de 1, 100 y 500 unidades del Sistema.

Los precios de los componentes se seleccionaron de las páginas Digi-Key Electronics y Aliexpress, de las cuales se obtuvieron los componentes para el diseño del PCB de este proyecto, con la excepción de las Celdas y el Cargador que fueron adquiridos por la Universidad de Cuenca y la mochila que se adquirió en un almacén de la localidad.

Los resultados se presentan en la Tabla [G.1](#), en donde se puede apreciar que los componentes más costosos son las Celdas, con un total de \$ 800 dólares, casi el 64.76 % del costo total, esto debido a su gran capacidad y a que éstas fueron importadas.

Tabla G.1: Estimación del Costo unitario del Sistema al producir 1, 100 y 500 unidades

Materiales	Cantidad	Coste unitario (dólares)	Coste unitario por 100 unidades (dólares)	Coste unitario por 500 unidades (dólares)
Convertidores DC-DC VX780X-1000	7	3,46	3,0807	2,7972
Convertor DC-DC XL4015	1	1,3	1,28	1,25
LTC6802-2	1	17,34	11,8218	11,8218
Termistor NTCle413	1	2,08	1,1819	1,0494
Sensor ACS712	2	5,07	2,7564	2,30942
Arduino Nano	1	2,5	2,4	2,3
Baterías 26Ah Prismatic Pouch Cell	8	120	100	95
Cargador PB-360P-24	1	91,76	85,84	82,88
Resistencia de 15 Ohms 2512	8	0,31	0,1041	0,08712
Resistencia de 1 KOhms 0805	5	0,11	0,0394	0,01832
Resistencia de 3.3 KOhms 0805	8	0,11	0,04	0,02
Resistencia de 10 KOhms 0805	2	0,11	0,04	0,02
Transistor SI2351DS	8	0,45	0,25	0,21
Diodo Zener 12v	8	0,16	0,07	0,04
Capacitores 220uF	14	0,2	0,1	0,07
Conector 9 pines 4.2mm	1	0,25	0,2	0,19
Peinetas tipo Macho	1	0,5	0,3	0,1
Peinetas tipo Hembra	2	0,5	0,3	0,1
Conector tipo arandela AWG 8	4	0,21	0,17	0,15
Conector tipo arandela AWG 16	9	0,2	0,11	0,09
Conector automotriz de 9 pines	2	1	0,92	0,75
Conector de 2 pines	2	0,15	0,08	0,07
Conector 4x2 4.2mm	2	1,37	1,3	0,84
Borneras	2	0,43	0,38	0,32
Conector USB	1	0,5	0,36	0,32
Diodo LED 3mm	5	0,16	0,13	0,11
Interruptor de 1A	1	0,3	0,25	0,22
Interruptor de 20A a 120 VAC	1	0,99	0,8	0,76
Pernos M3	7	0,08	0,08	0,08
Pernos M4	8	0,08	0,08	0,08
Pernos M6	9	0,1	0,1	0,1
Tuerca M3	7	0,04	0,04	0,04
Tuerca M4	8	0,04	0,04	0,04
Tuerca M6	9	0,05	0,05	0,05
Arandelas de 10 mm	14	0,04	0,04	0,04
Arandelas de 14mm	25	0,05	0,05	0,05
Metro de Cable AWG 8 flexible	4	1,8	1,2	0,8
Metro de Cable AWG 22 flexible	5	0,3	0,22	0,15
Contenedor de Baterías	1	7	6	4
PCB	1	58	45	20
Caja Contenedora	1	9,3	8,8	7,3
Prensa-Estopa PG-21	4	0,3	0,25	0,2
Mochila	1	12	10,5	8
Precio unitario		1235,19	1027,3412	944,189

Fuente: Recopilación de digikey.com y aliexpres.com



## Bibliografía

- [1] R. Gutierrez, P. A. Niño-Suarez, O. F. Aviles -Sanchez, F. Vanegas, y J. Duque, “EXOESQUELETO MECATRÓNICO PARA REHABILITACIÓN MOTORA,” 8<sup>o</sup> CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA, p. 9, 2007. [En línea]. Disponible: <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/19/19-22.pdf>
- [2] A. F. Ruiz Olaya, “Sistema robótico multimodal para análisis y estudios en biomecánica, movimiento humano y control neuromotor,” mar 2009. [En línea]. Disponible: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/5636>
- [3] N. Prinsloo y I. De Vries, “Design and development of a battery cell voltage monitoring system,” Ph.D. dissertation, Cape Peninsula University of Technology, 2011. [En línea]. Disponible: [http://etd.cput.ac.za/bitstream/handle/20.500.11838/1163/Prinsloo{\\_\\_}N{\\_\\_}MTech{\\_\\_}Designanddevelopmentofbattery.pdf?sequence=1{&}isAllowed=y](http://etd.cput.ac.za/bitstream/handle/20.500.11838/1163/Prinsloo{__}N{__}MTech{__}Designanddevelopmentofbattery.pdf?sequence=1{&}isAllowed=y)
- [4] L. Technology Corporation, “LTC6802-2 - Multicell Addressable Battery Stack Monitor,” Linear Technology Corporation, Tech. Rep., 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.linear.com/leadfree/>
- [5] L. I. Minchala Ávila, D. F. Astudillo Salinas, K. S. Palacio Baus, J. A. Barreto Andrade, y W. T. Contreras Calle, “Prototipo de exoesqueleto usable en las extremidades inferiores,” Dirección de Investigación -DIUC- Universidad de Cuenca, Tech. Rep., 2015.
- [6] J. C. Perry, “Design and development of a 7 degree-of-freedom powered exoskeleton for the upper limb,” 2006. [En línea]. Disponible: <https://digital.lib.washington.edu/researchworks/handle/1773/7077>
- [7] R. López, J. Torres, S. Salazar, R. Lózano, y M. Cinvestav, “Desarrollo de un Exoesqueleto para Rehabilitación de Tobillo y Rodilla,” Tech. Rep. 1, 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmib/v35n1/v35n1a4.pdf>



- [8] D. Andrea, *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Artech House, 2010. [En línea]. Disponible: <https://books.google.com.ec/books/about/Battery{ }Management{ }Systems{ }for{ }Large{ }Lit.html?id=o-QpFOR0PTcC{ }&redir{ }esc=y>
- [9] M. Rosina, “Stationary Storage and Automotive Li-ion Battery Packs,” Yole Développement, Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: [www.i-micronews.com](http://www.i-micronews.com)
- [10] I. Buchmann, *Batteries in a portable world : a handbook on rechargeable batteries for non-engineers*, cadex elec ed., Columbia, 2016.
- [11] J. Guerra Estévez y A. Pérez Vega-Leal, “Sistemas De Gestión De Baterías,” Universidad de Sevilla, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5722/fichero/Dise{ }~{ }n{ }o+de+Sistemas+de+gesti{ }ó+n+de+bater{ }í}.pdf>
- [12] M. Daowd, N. Omar, P. Van, D. Bossche, y J. Van Mierlo, “A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink,” Tech. Rep., 2011. [En línea]. Disponible: <https://pdfs.semanticscholar.org/0c70/9b4b316d682e6503de5d342d84ef69738c15.pdf>
- [13] Maxon Motor, “EC 90 flat  $\varnothing$  90 mm, brushless, 90 Watt,” Maxon Motor, Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.maxonmotor.com/medias/sys{ }master/root/8825435389982/17-EN-271.pdf>
- [14] —, “EC 45 flat  $\varnothing$  42.8 mm, brushless, 70 Watt,” Maxon Motor, Tech. Rep., 2017.
- [15] —, “EPOS4 position controller,” Maxon Motor, Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://epos.maxonmotor.com>
- [16] E. López Pérez, “Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) Teoría y Aplicaciones,” Ingeniería en Microcontroladores, México, Tech. Rep., 2005. [En línea]. Disponible: <http://www.i-micro.com/pdf/articulos/spi.pdf>
- [17] Raspberry PI (Trading) Ltd., “Raspberry Pi Compute Module (CM1) Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3) Raspberry Pi Compute Module 3 Lite (CM3L) First release 1 Version 1.0 Compute Module Datasheet,” Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/datasheets/rpi{ }DATA{ }CM{ }1p0.pdf>
- [18] Arduino, “Arduino Nano (V2.3) User Manual,” Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>
- [19] CUI Inc, “VX78-1000 NON-ISOLATED DC SWITCHING REGULATOR,” CUI Inc, Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.cui.com/product/resource/vx78-1000.pdf>
- [20] XLSEMI, “Datasheet 5A 180KHz 36V Buck DC to DC Converter XL4015,” XLSEMI, Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.xlsemi.com/datasheet/xl4015datasheet.pdf>



- [21] Texas Instruments, “Bq769x0 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-Ion and Phosphate Applications,” Texas Instruments, Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.ti.com/lit/ds/slusbk2g/slusbk2g.pdf>
- [22] Renesas Electronics, “ISL94202 Series Charge/Discharge Path 3-to-8 Cell Li-Ion Battery Pack Monitor DATASHEET,” Renesas Electronics, Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.intersil.com/content/dam/intersil/documents/isl9/isl94202.pdf>
- [23] A. Devices, “LTC6801 Independen multicell battery stack fault monitor,” Analog Devices, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC6801.pdf>
- [24] L. Technology Corporation, “LTC6802-1 - Multicell Battery Stack Monitor,” Tech. Rep., 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/68021fa.pdf>
- [25] I. Vishay Intertechnology, “NTCLE413, NTCLE428,” Vishay Intertechnology, Inc., Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.vishay.com/docs/29078/ntcle413.pdf>
- [26] Allegro MicroSystems. Inc., “Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor,” Allegro MicroSystems. Inc., Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/168326/ALLEGRO/ACS712.html>
- [27] RASPBERRY PI FOUNDATION, “Raspberry Pi hardware - Raspberry Pi Documentation.” [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md>
- [28] T. Cruz-Gavilanes, N. Cruz-Gavilánez, M. Álvarez-lozano, y C. Martínez-Santander, “Desarrollo de la motricidad fina en niños con parálisis cerebral espástica mediante la aplicación de terapia psicomotriz,” *Agro Productividad*, vol. 10, num. 10, pp. 98–102, 2017. [En línea]. Disponible: <http://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/79>
- [29] C. Yam, M. S. Nixon, y J. N. Carter, “Automated person recognition by walking and running via model-based approaches,” *Pattern Recognition*, vol. 37, num. 5, pp. 1057–1072, may 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031320303003996>
- [30] A123 Systems, “26Ah Prismatic Pouch Cell NMC Lithium-Ion,” A123 Systems, Tech. Rep., 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.altertek.com/new/wp-content/uploads/2017/02/26Ah{ }2016.pdf>



- [31] A. ltd., “A123 26Ah Lithium Ion NMC Pouch Cell | Altertek,” 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.altertek.com/products/lithium-ion-pouch-cylindrical-cells/a123-li-ion-cells/a123-26ah-lithium-ion-nmc-pouch-cell/>
- [32] Mean Well y Jameco Electronics, “PB-300/360 User’s Manual,” Mean Well, Tech. Rep. [En línea]. Disponible: <https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1952417Users%20Manual.pdf>
- [33] C. Peña Ordoñez, “Estudio de Baterías para Vehículos Eléctricos,” Universidad Carlos III de Madrid, Tech. Rep., 2011. [En línea]. Disponible: <https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11805/PFC{ }Carlos{ }Pena{ }Ordonez.pdf?sequence=1{ }isAllowed=y{ }fbclid=IwAR2pmF8dVXKec2l0s1ZxGY9A4EW24Qzp3W4Ji8rLaxBLiups0w8ZxONISfg>
- [34] HIOKI E.E CORPORATION, “POWER METER PW3336, PW3337 High-precision, 3-channel power meter with built-in harmonic measurement,” HIOKI E.E CORPORATION, Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.hioki.com/file/cmw/hdCatalog/4483/pdf/?action=browser{ }log=1{ }lang=en{ }fbclid=IwAR1vWc1G6yY0E6Mnt-18XDL00-lOm22dLcd8wmMYmGsSasdu0dhwLpXwlMc>
- [35] De Lorenzo S.p.A., “ELECTRIC MACHINES UNIPLAN 3.5kW,” De Lorenzo S.p.A., Milano, Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.delorenzoglobale.com>